

**ISSN 2078-4481**

Міністерство освіти і науки України  
Херсонський національний технічний університет

# **ВІСНИК**

**Херсонського національного  
технічного університету**

**2(69)**

**частина 2**

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 7 від 5 липня 2019 року)

---

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 11.07.2016 № 820), у яких можуть  
публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів  
доктора та кандидата технічних наук

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
РИНЦ (eLibrary)

**Херсон 2019**

## **Редакційна рада**

### **Головний редактор**

Литвиненко В.І.

д.т.н., професор,

завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук

### **Відповідальний секретар**

Дяченко Л.М.

начальник навчально-наукового відділу

## **Редакційна колегія**

Баганов Є.О.

Букетов А.В.

Дімітрова В.Я. (Болгарія)

Жарікова М.В.

Зайцева О.І.

Коган О.Г. (Білорусь)

Куник О.М.

Партицький С. (Польща)

Повстяной В.М.

Савіна Г.Г.

Сарібєкова Д.Г.

Сарібєкова Ю.Г.

Семешко О.Я.

Сошко В.О.

Сошко О.І.

Хрущ Н.А.

Чурсіна Л.А.

Шарко М.В.

Шерстюк В.Г.

к.т.н., доцент

д.т.н., професор

д.н., доцент

к.т.н., доцент

к.е.н., доцент

д.т.н., професор

к.т.н., старший викладач

д.с.н., професор

к.х.н., доцент

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

к.т.н., с.н.с.

к.т.н., доцент

д.т.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

**ISSN 2078-4481**

Министерство образования и науки Украины  
Херсонский национальный технический университет

# **ВЕСТНИК**

**Херсонского национального  
технического университета**

**2(69)**

**часть 2**

Рекомендовано к печати Ученым советом  
Херсонского национального технического университета  
(протокол № 7 от 5 июля 2019 года)

---

Журнал включен в Перечень научных специализированных изданий Украины  
(приказ Министерства образования и науки Украины от 11.07.2016 № 820),  
в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание  
ученых степеней доктора и кандидата технических наук

Журнал включен в наукометрические базы, электронные библиотеки и репозитории:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
РИНЦ (eLibrary),

**Херсон 2019**

## **Редакционный совет**

### **Главный редактор**

Литвиненко В.И.

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой информатики и компьютерных наук

### **Ответственный секретарь**

Дяченко Л.Н.

начальник учебно-научного отдела

## **Редакционная коллегия**

Баганов Е.А.

Букетов А.В.

Димитрова В.Я. (Болгария)

Жарикова М.В.

Зайцева Е.И.

Коган А.Г. (Беларусь)

Куник А.Н.

Партицкий С. (Польша)

Повстяной В.М.

Савина Г.Г.

Сарибекова Д.Г.

Сарибекова Ю.Г.

Семешко О.Я.

Сошко А.И.

Сошко В.А.

Хрущ Н.А.

Чурсина Л.А.

Шарко М.В.

Шерстюк В.Г.

к.т.н., доцент

д.т.н., профессор

д.н., доцент

к.т.н., доцент

к.э.н., доцент

д.т.н., профессор

к.т.н., старший преподаватель

д.с.н., профессор

к.х.н., доцент

д.э.н., профессор

д.т.н., профессор

д.т.н., профессор

к.т.н., с.н.с.

д.т.н., профессор

к.т.н., доцент

д.э.н., профессор

д.т.н., профессор

д.э.н., профессор

д.т.н., профессор



**ISSN 2078-4481**

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Kherson National Technical University

**VISNYK**  
**of Kherson National**  
**Technical University**

**2(69)**  
**part 2**

Recommended for publication by the Academic Council of  
Kherson National Technical University  
(minutes № 7 on 5th July 2019)

---

The journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine (Order № 820 of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated 11 July 2016) where the results of the theses of Doctor and Candidate of Engineering Science can be published

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
RSCI (eLibrary)

**Kherson 2019**

## **Editorial Board**

### **Editor-in-Chief**

Litvinenko V.I.

Doctor of Engineering Science, Professor

Head of the Department of Informatics and Computer Science

### **Executive Secretary**

Dyachenko L.N.

Head of Academic and Scientific Department

## **Members of Editorial Board**

**Baganov Ye.A.**

Ph.D., Associate Professor

**Buketov A.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Dimitrova V.Ya.** (Bulgaria)

Ph.D., Associate Professor

**Zharikova M.V.**

Ph.D., Associate Professor

**Zaitseva E.I.**

Ph.D., Associate Professor

**Kogan A.G.** (Belarus)

Doctor of Engineering Science, Professor

**Kunik A.N.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Partitsky S.** (Poland)

Doctor of Social Sciences, Professor

**Povstyanoy V.M.**

Ph.D., Associate Professor

**Savina G.G.**

Doctor of Economics, Professor

**Saribekova D.G.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Saribekova Yu.G.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Semeshko O.Ya.**

Ph.D., Senior Researcher

**Soshko A.I.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Soshko V.A.**

Ph.D., Associate Professor

**Khrushch N.A.**

Doctor of Economics, Professor

**Chursina L.A.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Sharko M.V.**

Doctor of Economics, Professor

**Sherstyuk V.G.**

Doctor of Engineering Science, Professor

## ЗМІСТ

## ЕЛЕКТРОНІКА І ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Р.І. КУДЕЛЬКІН, В.С. ЛУКОВЦЕВ</b> РОЗРАХУНОК ВХІДНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОТУЖНИХ КЛЮЧІВ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ ДЛЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО УПРАВЛІННЯ .....                                                         | 11 |
| <b>О.С. МАЗМАНШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК</b> ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ВИХОДІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ В ГРАДІЄНТНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ: МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТ .....                                    | 17 |
| <b>І.В. МЕЛЬНИК, А.В. ПОЧИНОК</b> ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ГРАНИЧНОЇ ТРАЕКТОРІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПРИФОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЛІНІЙНИМИ ТА КВАДРАТИЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧНИХ ВИРАЗІВ ..... | 23 |

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

|                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>С.В. ВОРОНЕНКО, І.М. ЩЕНКО, Г.В. РУДАКОВА, Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУДНОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ .....                                                                        | 31  |
| <b>І.М. ГВОЗДЕВА, М.А. ЯКИМЕНКО, В.В. ДЕМІРОВ, В.Ф. МИРГОРОД, Є.В. ДЕРЕНГ</b> ОЦІНКА ЕЛЕМЕНТІВ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТІВ .....                                             | 39  |
| <b>В.І. ГНІТЬКО, Л.В. РОЗОВА, А.Ю. ГАРМАШ</b> АНАЛІЗ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ З ПЕРЕГОРОДКАМИ ЗА РІЗНІ УМОВИ ЗАКРІПЛЕННЯ .....                                                                                             | 47  |
| <b>О.В. ДОБАРІНА, К.В. БЕГЛОВ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС ПРИ ЗМІНЕННІ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ .....                                                                                                  | 54  |
| <b>В.І. ДУБРОВІН, О.І. ЮСЬКІВ</b> КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....                                                                                                                            | 61  |
| <b>С.В. СМЕЛЬЯНОВ, Л.С. ФОНАР, М.О. БАРАБАНОВ</b> СИНХРОННО-ГРЕБІНЧАСТИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ РЕГУЛЯРНИХ КОМПОНЕНТІВ У ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛАХ РОТОРНИХ МАШИН .....                                                                  | 69  |
| <b>М.І. КЛИМЕНКО, С.І. ГОМЕНЮК, С.М. ГРЕБЕНЮК, О.В. КУДІН</b> ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В'ЯЗКОПРУЖНОГО ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТУ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ЗСУВІ .....                         | 75  |
| <b>М.Д. КОШОВИЙ, І.І. КОШОВА, О.М. КОСТЕНКО</b> ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....                                                                                                      | 81  |
| <b>А.М. МАЦУЙ, В.О. КОНДРАТЕЦЬ, А.А. АБАШИНА</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ЦИКЛУ «МЛИН-КЛАСИФІКАТОР» В ПЕРШІЙ СТАДІЇ РУДОПІДГОТОВКИ .....                                                           | 86  |
| <b>Р.С. МУСІЙ, Н.Б. МЕЛЬНИК, Х.Т. ДРОГОМИРЕЦЬКА, Б.Й. БАНДИРСЬКИЙ, Л.В.ГОШКО</b> ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА ДІЇ АМПЛІТУДНО МОДУЛЬОВАНОГО РАДІОІМПУЛЬСА ..... | 96  |
| <b>С.І. ОСАДЧИЙ, І.А. БЕРЕЗЮК, Д.М. ЛУЖКОВ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ .....                                                                                                         | 103 |
| <b>С.Ф. ПИЛИПАКА, І.Ю. ГРИЩЕНКО, В.М. БАБКА, Т.А. КРЕСАН, Т.П. ФЕДОРИНА</b> РУХ ЧАСТИНКИ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ВЛАСНОЇ ВАГИ ПО КРИВІЙ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРА.....                                                      | 110 |
| <b>Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКА, В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, В.В. ТИЧКОВ</b> ОПТИМАЛЬНИЙ СУРОГАТНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ НАКЛАДНИХ КРУГОВИХ НЕСПІВВІСНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ РІВНОМІРНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ В ЗОНІ КОНТРОЛЮ .....                       | 118 |
| <b>А. В. УСОВ, М. В. КУНЦІН</b> ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ .....                                                                                            | 126 |
| <b>Н.О. ЯРЕЦЬКА</b> ПРОСТОРОВА КОНТАКТНА ЗАДАЧА ПРО ТИСК ПРУЖНОГО КІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ НА ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИЙ ПІВПРОСТІР .....                                                                              | 134 |

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>А.В. АМУРОВ, Ю.В. БРАЗЛУК, О.І. ГУБІН, Д.В. ЄВДОКИМОВ</b> ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕВОЛЮЦІЇ РІДИННОГО КОНТУРУ .....                                                                                                                                                       | 140 |
| <b>А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Ю.Е. ВЯЛА, А.В. ГЕЙЛИК, О.В. ЛЯШКО, І.В. СМІРНОВ</b> ЗАДАЧА ПРО ЗАМІНУ ОБЛАДНАННЯ: ДЕЯКІ СПЕЦІАЛЬНІ ВИПАДКИ .....                                                                                                                                             | 153 |
| <b>Л.Г. АХМЕТИШІНА, А.О. ЄГОРОВ</b> СЕГМЕНТАЦІЯ СЛАБКОКОНТРАСТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ОРТОГОНАЛЬНОМУ БАЗИСІ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ НЕЧІТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ .....                                                                                                                              | 160 |
| <b>І.В. БАКЛАН, О.К. ОЧЕРЕТЯНИЙ, Я.І. БАКЛАН</b> КУБ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕОРІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНИХ МОВ ПРОГРАМУВАННЯ .....                                                                                                                                                           | 166 |
| <b>Д.Б. ВЕНГРОВИЧ, І.В. БЄЛІНСЬКИЙ, В.А. ЛЕМЕШКО</b> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ВІДОКРЕМЛЕНОЇ ХВИЛІ ЧЕРЕЗ ГРАНІТНУ ПЕРЕШКОДУ .....                                                                                                                                 | 172 |
| <b>В.В. ГНАТУШЕНКО, В.В. ЖЕРНОВИЙ</b> КОМПЛЕКСНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ НАБОРУ ДАНИХ З СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ НАДВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ ТРЕНУВАННЯ МЕРЕЖІ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ .....                                                                                      | 180 |
| <b>П.Й. ГУЧЕК, О.М. ДУДЧЕНКО</b> ОДИН З ПІДХОДІВ АНАЛІЗУ ЧАСУ ПОЛЬОТУ ФОТОНІВ З МЕТОЮ УСУНЕННЯ ВПЛИВУ НЕДОСКОНАЛОСТІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ .....                                                                                                                                   | 187 |
| <b>Н.Л. ДОРОШ, Л.М. ПЕТРЕЧУК, Т.М. ФЕНЕНКО</b> РОЗРОБКА І ЗАСТОСУВАННЯ НАДБУДОВИ EXCEL ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ .....                                                                                                                                                           | 196 |
| <b>В.М. КОРЧИНСЬКИЙ</b> ГРАНИЧНІ ФОРМИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ, ЗАДАНИХ НА МНОЖИНІ РЕАЛІЗАЦІЇ .....                                                                                                                                                                                    | 202 |
| <b>О.В. ОШАРОВСЬКА, І.В. ОШАРОВСЬКИЙ, Н.П. ГУРЧЕНКО</b> ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ІЩІЛЬНИХ УПАКОВОК ПРИ ФОРМУВАННІ ЗОБРАЖЕНЬ .....                                                                                                                                                     | 207 |
| <b>О.В. ПОЛИВОДА, Г.В. РУДАКОВА, І.Ю. КОНДРАТЬЄВА</b> АНАЛІЗ АКУСТИЧНОГО ШУМУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ У ФАЗОВОМУ ПРОСТОРИ .....                                                                                                                                                        | 214 |
| <b>О.В. РЕУТА, Х. ХАБРАМАН, А.О. ЯКУНІН</b> ПОБУДОВА СКЛАДЕНИХ ВОКСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПЕРАЦІЙ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ .....                                                                                                                    | 222 |
| <b>О.О. РОМАНОВ, О.В. ЦАРУК, О.О. БРОВАРЕЦЬ</b> НЕОБХІДНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ «ФЛОРАТЕСТ» ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ АГРОБІОЛОГІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР МЕТОДОМ ПРОВЕДЕННЯ ІНДУКЦІЇ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ НАТИВНОГО ХЛОРОФІЛУ ..... | 228 |
| <b>Д.М. СВИНАРЕНКО</b> ПОКРАЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ АНАЛІЗУ БАГАТОВИМІРНИХ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ОРТОГОНАЛІЗАЦІЇ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЙ .....                                                                                                                                    | 244 |
| <b>Н.О. СОКОЛОВА, А.С. БЄЛОВ</b> ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТА РОБОЧОГО МІСЦЯ .....                                                                                                                                                                              | 250 |
| <b>П.П. ТРОХИМЧУК</b> ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ АВТОМАТІВ ТА ЕФЕКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ .....                                                                                                                                                                            | 256 |
| <b>В.Є. ХОДАКОВ, А.Є. СОКОЛОВ, Г.В. ВЕСЕЛОВСЬКА</b> ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОТИВАЦІЙНИХ СКЛАДОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НАВЧАННЯ .....                                                                                                            | 264 |
| <b>О.М. ХОШАБА</b> ОЦІНКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ .....                                                                                                                                                                                                             | 271 |

## ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ШКОЛИ

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Л.В. КУЗЬМИЧ, Н.В. ВАЛЬКО</b> ІНТЕРПРЕТАЦІЯ, МОДЕЛЬ, МЕТОДИ ДОВЕДЕНЬ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ – ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ МІЖПРЕДМЕТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ПРИ ВИВЧЕННІ МАТЕМАТИКИ ..... | 280 |
| <b>В.В. ПОЛИВОДА, О.В. ПОЛИВОДА</b> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ НАВЧАЛЬНИМ ПРОЦЕСОМ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ .....                                       | 288 |
| <b>М.О. ЦАРЕНКО, Г.М. ТОЛПЕКІНА, О.В. ПОНОМАРЕНКО</b> АДАПТИВНИЙ ПІДХІД ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО КЛАСУ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ .....        | 294 |

---

**CONTENTS**


---

**ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING**

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>R.I. KUDELKIN, V.S. LUKOVTSSEV</b> INPUT CIRCUITS CALCULATION OF POWERFUL KEYS BASED ON MOSFET-TRANSISTORS FOR MICROCONTROLLER CONTROL .....                                                   | 11 |
| <b>A.S. MAZMANISHVILI, N.G. RESHETNYAK</b> ELECTRON BEAM DYNAMICS AT THE OUTPUT MAGNETRON GUN IN GRADIENT MAGNETIC FIELD: MODELING AND EXPERIMENT .....                                           | 17 |
| <b>I.V. MELNYK, A.V. POCHYNOK</b> INTERPOLATION OF BOUNDARY TRAJECTORY OF ELECTRON BEAM IN THE FOCAL REGION BY THE LINEAR AND SQUARE FUNCTIONS WITH USING OF ARITHMETIC-LOGICAL EXPRESSIONS ..... | 23 |

**ENGINEERING SCIENCES**

|                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>S.V. VORONENKO, I.M. ISCHENKO, H.V. RUDAKOVA, Yu.O. LEBEDENKO</b> MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX SHIPBOARD POWER PLANT WITH TURBOCHARGER.....                                                                                              | 31  |
| <b>I.M. HVOZDEVA, M.A. YAKYMENKO, V.V. DEMIROV, V.F. MYRHOROD, Y.V. DERENH</b> ESTIMATION OF SPACE ELEMENTS OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF TECHNICAL CONDITION OF THE SHIP DIESEL GENERATOR SETS .....                                          | 39  |
| <b>V.I. GNITKO, L.V. ROZOVA, A.Y. GARMASH</b> FREE VIBRATION ANALYSIS OF SHELLS OF REVOLUTION WITH BAFFLES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF FIXATION .....                                                                                      | 47  |
| <b>O.V. DOBARINA, K.V. BEGLOV</b> RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE NUCLEAR POWER PLANT LOADING WHEN CONTROL PROGRAM IS BEEN CHANGING ..                                                                                       | 54  |
| <b>V.I. DUBROVIN, O. I. YUSKIV</b> MANAGEMENT OF PROCESSES OF ENERGY SAVING AT METALLURGICAL ENTERPRISES .....                                                                                                                               | 61  |
| <b>S.V. YEMELYANOV, L.S. FONAR, M.A. BARABANOV</b> SYNCHRONOUSLY-COMB FILTER FOR THE ALLOCATION OF REGULAR FEATURE IN THE VIBROACOUSTIC SIGNALS OF ROTATING MACHINES .....                                                                   | 69  |
| <b>M.I. KLYMENKO, S.I. HOMENIUK, S.M. GREBENIUK, O.V. KUDIN</b> THE DETERMINING OF A VISCOELASTIC TRANSTROPIC FIBER COMPOSITE EFFECTIVE CHARACTERISTICS UNDER LONGITUDE SHEAR .....                                                          | 75  |
| <b>N.D. KOSHEVOY, I.I. KOSHEVAYA, E.M. KOSTENKO</b> OPTIMUM EXPERIMENTS PLANNING FOR RESEARCH IN TECHNOLOGICAL PROCESSES .....                                                                                                               | 81  |
| <b>A.N. Matsui, V.A. KONDRATETS, A.A. ABASHINA</b> INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF THE BALL DOWNLOAD OF THE CYCLE "MILL-CLASSIFIER" CYCLE IN THE FIRST STAGE OF PREPARATION .....                                                           | 86  |
| <b>R.S. MUSII, N.B. MELNYK, K.T. DROHOMYRETSKA, B.J. BANDYRSKYJ, L.V. HOSHKO</b> DETERMINATION OF TEMPERATURE-POWER REGIME OF FUNCTIONING OF ELECTROCONDUCTIVE TABULAR ELEMENT UNDER THE INFLUENCE OF AMPLITUDE MODULATED RADIOIMPULSE ..... | 96  |
| <b>S.I. OSADCHY, I.A. BEREZYUK, D.M. LUZSHKOV</b> RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE REFRIGERATION CHAMBER IN REAL OPERATION CONDITIONS .....                                                                                                   | 103 |
| <b>S.F. PYLYPAKA, I.YU. GRISCHENKO, V.M. BABKA, T.F. KRESAN, T.P. FEDORINA</b> PARTICLE MOTION UNDER THE EFFECT OF THE OWN WEIGHT BY A CURVE OF A CROSS-SECTION OF A HORIZONTAL CYLINDER .....                                               | 110 |
| <b>R.V. TREMBOVETSKA, V.Ya. HALCHENKO, V.V. TYCHKOV</b> OPTIMAL SURROGATE PARAMETRIC SYNTHESIS OF SURFACE CIRCULAR NON-AXIAL EDDY-CURRENT PROBES WITH UNIFORM SENSITIVITY IN THE TESTING ZONE .....                                          | 118 |
| <b>A.V. USOV, M.V. KUNITSYN</b> TECHNOLOGICAL QUALITY ASSURANCE OF FINISHING OF CYLINDRICAL SURFACES WITH WEAR-RESISTANT COATINGS.....                                                                                                       | 126 |
| <b>N.A. YARETSKA</b> SPATIAL CONTACT PROBLEM OF PRESSURE OF THE ELASTIC ANNULAR PUNCH WITH INITIAL STRESSES ON THE PRE-STRESSED SEMI-SPACE .....                                                                                             | 134 |

## INFORMATION TECHNOLOGY

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>A.V. AMUROV, Iu.V. BRAZALUK, O.I. GUBIN, D.V. YEVDOKYMOV</b> NUMERICAL INVESTIGATION OF LIQUID CONTOUR EVOLUTION PROCESS .....                                                                            | 140 |
| <b>A.Yu. ANDREYTSSEV, Yu.E. VYALA, A.V. HEYLIK, O.V. LIASHKO, I.V. SMYRNOV</b> PROBLEM OF REPLACING EQUIPMENT: SOME SPECIAL CASES .....                                                                      | 153 |
| <b>L.G. AKHMETSHINA, A. A. YEGOROV</b> LOW-CONTRAST IMAGE SEGMENTATION IN THE ORTHOGONAL BASIS OF FUZZY CLUSTERING MEMBERSHIP FUNCTIONS .....                                                                | 160 |
| <b>I.V. BAKLAN, O.K. OCHERETIANY, Y.I. BAKLAN</b> CUBE OF MATHEMATICAL THEORIES OF MODELING HYBRID PROGRAMMING LANGUAGES .....                                                                               | 166 |
| <b>D.B. VENGROVICH, I.V. BELINSKII, V.A. LEMESHKO</b> EXPERIMENTAL RESEARCH OF PASSING SOLITARY WAVE THROUGH GRANITE OBSTACLE .....                                                                          | 172 |
| <b>V.V. HNATUSHENKO, V.V. ZHERNOVYI</b> MULTILEVEL SOLUTION FOR DATASET PREPARATION FROM THE VERY HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGERY FOR DEEP NEURAL NETWORK TRAINING .....                                   | 180 |
| <b>P.I. GUCHEK, O.N. DUDCHENKO</b> ONE OF THE APPROACHES TO THE ANALYSIS OF THE FLIGHT TIME OF PHOTONS IN ORDER TO ELIMINATE THE INFLUENCE OF THE IMPERFECTION OF THE MEASUREMENT SYSTEM .....               | 187 |
| <b>N.L. DOROSH, L.N. PETRECHUK, T.M. FENENKO</b> DESIGN AND USE OF EXCEL ADD-IN FOR TIME SERIES ANALYSIS .....                                                                                               | 196 |
| <b>V.M. KORCHINSKY</b> LIMITING FORMS OF THE DIGITAL SIGNALS DEFINED ON SET OF REALIZATIONS .....                                                                                                            | 202 |
| <b>O.V. OSHAROVSKA, I.V. OSHAROVSKIYI, N.P. GURCHENKO</b> USING THE THEORY OF DENSE PACKING IN THE FORMATION OF IMAGES .....                                                                                 | 207 |
| <b>O.V. POLYVODA, H.V. RUDAKOVA, I.U. KONDRATIEVA</b> ANALYSIS OF ELECTRIC EQUIPMENT ACOUSTIC NOISE IN PHASE SPACE .....                                                                                     | 214 |
| <b>O.V. REUTA, H.HABRUMMAN, A.O. YAKUNIN</b> BUILDING OF COMPOSITE VOXEL MODELS OF 3D OBJECTS USING FUZZY SET OPERATIONS .....                                                                               | 222 |
| <b>O.O. ROMANOV, O.V. TSARUK, O.O. BROVARETS</b> NEED FOR LOCAL USE A RAPID MONITORING "FLORATEST" AGROBIOLOGICAL IDENTIFICATION AND CONDITION OF CROP BY INDUCTION NATIVE FLUORESCENCE OF CHLOROPHYLL ..... | 228 |
| <b>D.M. SVYNARENKO</b> RESOLUTION ENHANCEMENT OF THE ANALYSIS OF MULTIDIMENSIONAL DIGITAL SIGNALS BASED ON ORTHOGONALIZATION OF THEIR IMPLEMENTATIONS .....                                                  | 244 |
| <b>N.O. SOKOLOVA, A.S. BIELOV</b> INFORMATION SYSTEM MONITORING OF MICROCLIMATE OF THE WORKPLACE .....                                                                                                       | 250 |
| <b>P.P. TROKHIMCHUCK</b> PROBLEMS OF CREATION UNIVERSAL AUTOMATA THEORY AND EFFECTIVE CALCULATIONS .....                                                                                                     | 256 |
| <b>V.Ye. KHODAKOV, A.Ye. SOKOLOV, G.V. VESELOVSKAYA</b> MODELING IMPROVEMENT IN MOTIVATIONAL COMPONENTS OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR COMPUTERIZED TRAINING SYSTEMS .....                                  | 264 |
| <b>O.M.KHOSHABA</b> PERFORMANCE ASSESSMENT OF COMPUTER SYSTEMS .....                                                                                                                                         | 271 |

## HIGHER SCHOOL PROBLEMS

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>L. KUZMICH, N. VALKO</b> INTERPRETATION, MODEL, METHODS OF EVIDENCE AND RESEARCH - WAYS OF IMPLEMENTATION OF INTER-DISCIPLINARY CONNECTIONS IN MATHEMATICS ..... | 280 |
| <b>V.V. POLYVODA, O.V. POLYVODA</b> AUTOMATED SYSTEM OF ACADEMIC PROCESS MANAGEMENT IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS .....                                          | 288 |
| <b>M.O. TSARENKO, G.M. TOLPEKINA, O.V. PONOMARENKO</b> ADAPTIVE APPROACH OF THE VIRTUAL EDUCATIONAL CLASS IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES .....       | 294 |

---

**ЕЛЕКТРОНІКА І ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

---

УДК 621.313.33.016

**Р.И. КУДЕЛЬКИН, В.С. ЛУКОВЦЕВ**  
Национальный университет «Одесская морская академия»**РАСЧЕТ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ МОЩНЫХ КЛЮЧЕЙ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ  
ДЛЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*В данной работе рассмотрена методика расчета выходных цепей каскадов управления мощными нагрузками под управлением микропроцессорных систем на базе Atmega328 в составе наборов Arduino для использования непрофильными специалистами в области производства электронных устройств. Также в статье приведен пример расчета выходного каскада управления, примененного в автоматическом измерителе поля рассеивания трехфазного асинхронного двигателя. Ключевыми моментами является обеспечение жестко заданных временных параметров узла формирования управляющих импульсов для мощных полевых транзисторов, что является неочевидной задачей при использовании подобных узлов. Описанная в статье методика расчета, позволяет рассчитать выходной каскад для управления мощным полевым транзистором для получения заданных временных параметров и обеспечения длительной безопасной работы разрабатываемых устройств на базе Atmega328 в составе наборов Arduino для использования непрофильными специалистами в области производства электронных устройств.*

*Ключевые слова:* Atmega328, выходной каскад, МДП-транзистор, скорость переключения, входное сопротивление.

**Р.І. КУДЕЛЬКІН, В.С. ЛУКОВЦЕВ**  
Національний університет «Одеська морська академія»**РОЗРАХУНОК ВХІДНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОТУЖНИХ КЛЮЧІВ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ ДЛЯ  
МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО УПРАВЛІННЯ**

*У даній роботі розглянута методика розрахунку вихідних ланцюгів каскадів управління потужними навантаженнями під керуванням мікропроцесорних систем на базі Atmega328 в складі наборів Arduino для використання непрофільними фахівцями в області виробництва електронних пристроїв. Також в статті наведено приклад розрахунку вихідного каскаду управління, застосованого в автоматичному вимірювачі поля розсіювання трифазного асинхронного двигуна. Ключовими моментами є забезпечення жорстко заданих часових параметрів вузла формування керуючих імпульсів для потужних польових транзисторів, що є неочевидною задачею при використанні подібних вузлів. Описана в статті методика розрахунку, дозволяє розрахувати вихідний каскад для управління потужним польовим транзистором для отримання заданих часових параметрів і забезпечення тривалої безпечної роботи розроблюваних пристроїв на базі Atmega328 в складі наборів Arduino для використання непрофільними фахівцями в області виробництва електронних пристроїв.*

*Ключові слова:* Atmega328, вихідний каскад, МДП-транзистор, швидкість перемикання, вхідний опір.

**R.I. KUDELKIN, V.S. LUKOVITSEV**  
National university «Odessa maritime academy»**INPUT CIRCUITS CALCULATION OF POWERFUL KEYS BASED ON MOSFET-TRANSISTORS  
FOR MICROCONTROLLER CONTROL**

*The paper studied the method of output powerful workload cascade control circuits calculation under the control of microprocessor-based systems Atmega328 as part of Arduino kits for use by non-core specialists in the field of electronic devices production. The technique described in the paper allows, for example, apply high-power field-effect transistors as executive elements (keys) for use with microcontroller output ports as part of three-phase induction motor scattering field meter. The decisive influence on the measurement accuracy is exerted by the exact timing of the “pumping current” supply time parameters, the time gap between the current shutdown and the short circuit of the motor windings and the time delay of the transient analysis. The paper shows an example of calculating an output control cascade applied in an automatic scattering field meter of three-phase induction motor. The key moments are to provide hard-set time parameters of the control pulse generation node for high-power field-effect transistors, which is a non-obvious task when using such nodes. Modern powerful MOSFET-transistors constitute a matrix which consists of connected in parallel thousands and*

tens of thousands elementary transistors. At the same time, the capacitance of the gate circuits of elementary MOS-structures are summarized, creating a significant gate capacitance for the total powerful transistor. To recharge this capacitance may require significant currents and the larger, the higher the switching speed of the transistor should be, or the steeper the front and the fall of the pulse generated by the transistor should be. The calculation technique described in the paper allows to calculate the output cascade for controlling a powerful field-effect transistor to obtain the specified time parameters and to ensure the long-term safe operation of the developed devices based on Atmega328 as part of Arduino kits for use by non-core specialists in the field of electronic devices production. The described technique is applicable also in the case of using not only the specified microcontrollers, but also any others that require corresponding power characteristics in the control circuits.

**Keywords:** Atmega328, output cascade, MOSFET-transistor, switching speed, input resistance.

### Постановка проблемы

Использование микроконтроллеров Atmega328 в составе наборов Arduino позволяет довольно простыми методами создавать оригинальные приборы, в т.ч. измерительные и управляющие. Доступность обучающих материалов по программированию микроконтроллера делает возможным разработку новых устройств специалистами в любой области, где возникает необходимость и желание разработать некоторое оригинальное микропроцессорное устройство. Как правило, при работе с указанными комплектами, не предполагается квалификация пользователя в области производства РЭА и опыта в профессиональных расчетах, что может привести к нежелательным ситуациям при реализации проекта.

### Формулировка цели исследования

В предлагаемой статье, в качестве примера, описана методика применения мощных полевых транзисторов в качестве исполнительных элементов (ключей) для использования совместно с выходными портами микроконтроллера в составе измерителя поля рассеивания асинхронного двигателя. Принцип действия устройства заключается в пропускании постоянного «тока накачки» в течение определенного времени, через обмотки двигателя, соединенные специальным образом. Затем, «ток накачки» отключается, обмотки замыкаются накоротко и на определенном временном интервале исследуется характеристика затухания тока короткого замыкания. Обработав математически полученные данные о характере затухания тока в обмотках двигателя, прибор вычисляет индуктивность рассеивания исследуемого электродвигателя. Определяющее влияние на точность измерения оказывает точная выдержка временных параметров подачи «тока накачки», временной зазор между отключением тока и замыканием обмоток двигателя и выдержка времени анализа переходного процесса. Сам микропроцессор в состоянии обеспечить формирование необходимых импульсов управления с требуемыми временными параметрами, но, учитывая, что ток выходных каскадов микропроцессора ограничен величинами в несколько десятков миллиампер, возникает необходимость использования внешних уможняющих каскадов, т.н. ключей. И, если согласование мощных полевых транзисторов в статическом режиме, совершенно не вызывает сложностей, в связи с очень высоким сопротивлением затвора мощного ключа, то использование этих же транзисторов в динамическом режиме, или с нормированными параметрами по времени включения/выключения, вызывает известные сложности. В самом худшем варианте, неверно выбранные параметры согласующих элементов, могут привести к «необъяснимым» выходам из строя как отдельных линий I/O, так и целиком микроконтроллера.

### Анализ последних исследований и публикаций

Выходные параметры каскадов вход/выход в режиме выходного каскада определены в официальном PDF-документе фирмы Microchip (Atmel Corporation), 7799D-AVR-11/10-PDF [1]. Выдержка из которого приведена на рис. 1.

|                                                                                       |                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Operating Temperature .....                                                           | -55°C to +125°C                |
| Storage Temperature.....                                                              | -65°C to +150°C                |
| Voltage on any Pin except RESET & UVcc<br>with respect to Ground <sup>(7)</sup> ..... | -0.5V to V <sub>CC</sub> +0.5V |
| Voltage on RESET with respect to Ground .....                                         | -0.5V to +13.0V                |
| Voltage on UVcc with respect to Ground.....                                           | -0.5V to +6.0V                 |
| Maximum Operating Voltage .....                                                       | 6.0V                           |
| DC Current per I/O Pin .....                                                          | 40.0 mA                        |
| DC Current V <sub>CC</sub> and GND Pins .....                                         | 200.0 mA                       |

Рис. 1. Технические характеристики микроконтроллера



А схемотехническое решение выходного каскада, взятое из того же документа [1, 67], приведено на рис. 2.

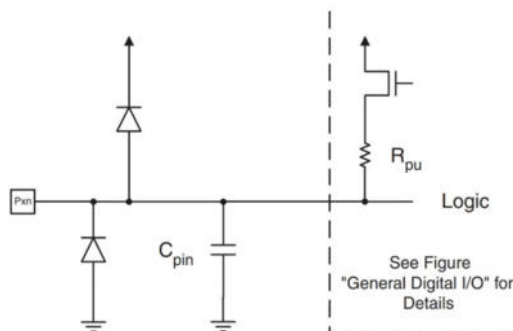


Рис. 2. Эквивалентная схема ввода/вывода микроконтроллера

Следует учитывать, что выходной ток каскада величиной в 40 мА приведен с оговоркой, что это максимально возможный ток, при котором возможен выход чипа из строя, а все графики, на которых так, либо иначе, фигурирует ток выходных каскадов, ограничены пределами в 20 мА (рис. 3) [1, 279].

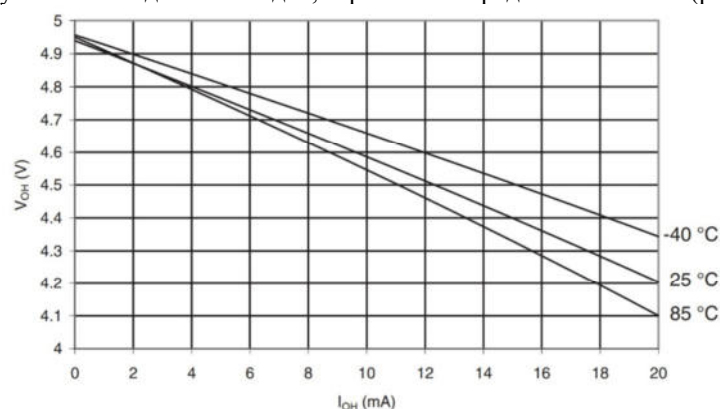


Рис. 3. Ток выходных каскадов микроконтроллера

Поэтому, с точки зрения надежности, будет правильным считать, что максимальный ток, который может обеспечить выходной каскад микроконтроллера, не должен превышать величину в 20 мА.

Как известно, наиболее точно динамические свойства полевого транзистора характеризуют не значение его паразитных емкостей, а полный заряд затвора – QG. Значение параметра QG связывает между собой математическим путем – импульсный ток затвора с временем переключения транзистора, тем самым предоставляя возможность разработчику правильно рассчитать узел управления.

К примеру, у полевого транзистора IRF1310 при токе стока  $I_S = 8$  А, напряжении сток-исток  $U_{DS} = 50$  В и напряжении затвор-исток  $U_{GS} = 10$  В полный заряд затвора равен  $Q_G = 110$  нКл. При неизменно напряжении затвор-исток заряд затвора уменьшается с увеличением тока стока  $I_S$  и с уменьшением напряжения сток-исток  $U_{GS}$ .

### Изложение основного материала исследования

Учитывая тот факт, что входное сопротивление затворной цепи полевого транзистора составляет довольно значительную величину в пределах  $1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^9$  Ом для транзисторов с PN переходом и  $1 \cdot 10^{10}$ – $1 \cdot 10^{14}$  Ом для МДП транзисторов, что может создать иллюзию практически нулевой потребляемой мощности затворными цепями ключевых транзисторов[3]. Но, при наличии жестких требований к временным параметрам формируемых ключами импульсов, возникают проблемы, связанные с реальной технологией производства мощных полевых транзисторов. Дело в том, что современные мощные МДП-транзисторы представляют собой матрицу, включенных параллельно тысяч и десятков тысяч элементарных транзисторов. При этом, емкости затворных цепей элементарных МДП-структур складываются, создавая значительную емкость затвора для суммарного мощного транзистора. Для перезарядки этой емкости могут потребоваться значительные токи и тем большие, чем выше должна быть скорость переключения транзистора, либо, чем круче должны быть фронт и спад формируемого транзистором импульса. Довольно часто, при попытке сформировать импульс с необходимыми параметрами, разработчик сталкивается либо с невозможностью получения требуемых импульсов, либо с «необъяснимым» выходом из строя маломощных каналов управления на выводах «вход/выход», либо, с

выходом из строя всего микроконтроллера. Данная проблема хорошо известна профессиональным разработчикам и проектировщикам РЭА и описана в соответствующей литературе.

Произведем расчет параметров схемы управления при условии, что необходимо достигнуть времени включения транзистора  $t_{ON} = 100$  нс. Временная задержка (защитный интервал) между сигналом на отключение источника постоянного тока и включением транзистора, замыкающего обмотку накоротко, выбрана равной 1 мкс, для исключения замыкания источника питания и для минимизации неучтенного тока в короткозамкнутой обмотке. С точки зрения допустимой погрешности этого защитного интервала в 10 % выберем время включения транзистора-ключа равным 100 нс. Для этого, ток управления драйвера должен иметь значение:

$$I_G = Q_G / t_{ON} \quad (1)$$

По формуле (1)

$$I_G = 110 \cdot 10^{-9} / 100 \cdot 10^{-9} = 1,1 \text{ А.}$$

При амплитуде импульсов управляющего напряжения на затворе  $U_G = 15$  В сумма сопротивлений выходного каскада драйвера и ограничительного резистора не должна превышать:

$$R_{MAX} = U_G / I_G \quad (2)$$

По формуле (2)

$$R_{MAX} = 15 / 1,1 = 13,6 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем выходное сопротивление драйверного каскада для микросхемы микроконтроллера, учитывая, что втекающий и вытекающий токи по выводам I/O могут достигать величины 40 мА максимум:

$$R_{ON} = U_{CC} / I_{MAX} \quad (3)$$

По формуле (3)

$$R_{ON} = 15 / 40 \cdot 10^{-3} = 375 \text{ Ом.}$$

$$R_{OFF} = U_{CC} / I_{MAX} \quad (4)$$

По формуле (4)

$$R_{OFF} = 15 / 40 \cdot 10^{-3} = 375 \text{ Ом.}$$

Учитывая расчетное значение по формуле (2)  $R_{MAX} = 13,6$  Ом приходим к заключению, что используя выходной каскад микроконтроллера Atmega328 непосредственно, заданное быстродействие (скорость переключения) транзистора IRF1310 получить невозможно. К этому же выводу можно прийти, сравнивая необходимые для заданного времени включения токи с токами, обеспечиваемыми выходным каскадом микроконтроллера.

Если в цепи затвора будет установлен резистор  $R_{GATE} = 13,6$  Ом, время включения транзистора определим следующим образом:

$$R_{EON} = R_{ON} + R_{GATE}, \quad (5)$$

где  $R_E$  – суммарное сопротивление;

$R_{ON}$  – входное сопротивление каскада микроконтроллера;

$R_{GATE}$  – сопротивление, установленное в цепь затвора силового транзистора.

По формуле (5)

$$R_{EON} = 375 + 13,6 = 388,6 \text{ Ом.}$$

$$I_{ON} = U_G / R_{EON}, \quad (6)$$

где  $I_{ON}$  – ток открытия;

$U_G$  – величина управляющего напряжения затвора.

По формуле (6)

$$I_{ON} = 15 / 388,6 = 39 \text{ мА.}$$

$$t_{ON} = Q_G / I_{ON}, \quad (7)$$

По формуле (7)

$$t_{ON} = 110 \cdot 10^{-9} / 0,0386 = 284 \text{ нс.}$$

Время выключения можно рассчитать, используя те же формулы:

$$R_{E_{OFF}} = R_{OUT} + R_{GATE}, \quad (8)$$

где  $R_E$  – суммарное сопротивление;

$R_{OUT}$  – выходное сопротивление драйвера;

$R_{GATE}$  – сопротивление, установленное в цепь затвора силового транзистора.

По формуле (8)

$$R_{E_{OFF}} = 375 + 13,6 = 388,6 \text{ Ом.}$$

$$I_{OFF} = U_G / R_{E_{OFF}}, \quad (9)$$

где  $I_{OFF}$  – ток открытия;

$U_G$  – величина управляющего напряжения затвора.

По формуле (9)

$$I_{OFF} = 15 / 388,6 = 38,6 \text{ мА.}$$

$$t_{OFF} = Q_G / I_{OFF} \quad (10)$$

По формуле (10)

$$t_{OFF} = 110 \cdot 10^{-9} / 0,0386 = 284 \text{ нс.}$$

К рассчитанным величинам необходимо добавить время собственного открытия-закрытия транзистора в результате чего реальное время  $t_{ON}$  составит:

$$t_{RON} = t_{ON} + t_{VTON}, \quad (11)$$

где  $t_{VTON} = 11 \text{ нс}$  для выбранного транзистора.

По формуле (11)

$$t_{RON} = 284 + 11 = 295 \text{ нс,}$$

а  $t_{ROFF}$  определим по следующей формуле:

$$t_{ROFF} = t_{OFF} + t_{VTOFF}, \quad (12)$$

где  $t_{VTOFF} = 45 \text{ нс}$  для выбранного транзистора.

По формуле (12)

$$t_{ROFF} = 284 + 45 = 329 \text{ нс.}$$

Простейший выход из создавшейся ситуации (без использования специализированных микросхем-драйверов затворов мощных полевых транзисторов) состоит в использовании буферного каскада эмиттерного повторителя, в котором один из транзисторов (NPN) обеспечивает необходимую длительность открывания мощного полевого ключа, а второй (PNP) – форсированную разрядку затворной емкости, обеспечивая необходимую длительность закрывания мощного полевого ключа. Необходимые минимальные значения коэффициентов усиления транзисторов буферного каскада можно найти из соотношения токов  $I_G$  и  $I_{MAX}$ .

$$I_G / I_{MAX} = 1,1 \text{ А} / 0,04 \text{ А} = 27$$

Для гарантированной работы выходного каскада микроконтроллера в облегченном режиме, выберем транзисторы с минимальным  $K_{yc} = 50$  и импульсным током коллектора 2А, например, 2N5551 и 2N5401. Полученная схема одного канала выходного каскада микроконтроллера приведена на рис. 4.

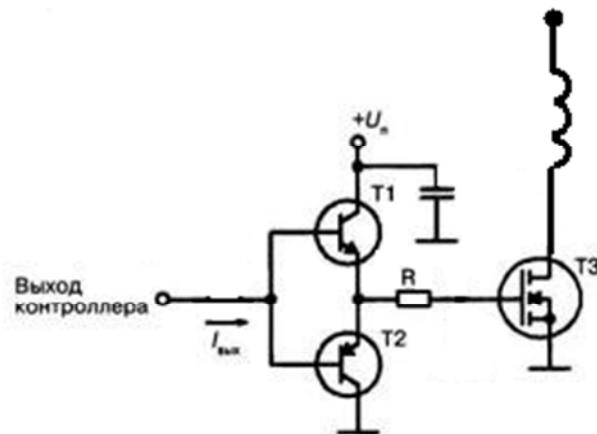


Рис. 4. Схема выходного каскада микроконтроллера

### Выводы

В данной статье рассмотрен один из вариантов расчета входной цепи мощного МДП-транзистора, работающего в качестве ключевого выходного каскада для микропроцессора Atmega328 в составе наборов Arduino и позволяющего обеспечить заданные временные параметры для управляемых цепей. Расчет предполагает использование широкодоступных сведений о параметрах выходных цепей микроконтроллеров и о параметрах входных цепей мощных МДП транзисторов и не требует профессиональной квалификации разработчика РЭА. В качестве примера, выбран каскад управления «током накачки» обмоток трехфазного электродвигателя для автоматического измерителя поля рассеивания асинхронного двигателя. Используя предложенную методику расчета, возможно быстро оценить возможность непосредственного управления мощными ключевыми МДП-транзисторами от слаботочных выходов микроконтроллера, либо получить подтверждение обязательного использования промежуточного буферного каскада.

### Список использованной литературы

1. 8-bit Microcontroller with 8/16/32K Bytes of ISP Flash and USB Controller. Atmel Corporation, 2010. URL: <http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc7799.pdf>
2. HEXFET Power MOSFET Datasheet IRF1310NPBF. International Rectifier, 2004. URL: <https://www.mouser.de/datasheet/2/196/irf1310npbf-1226959.pdf>
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: монография / пер. с англ. Б.Н. Бронина, А.И. Коротова, Ю.В. Четкина. Редакция литературы по информатике и новой технике: научное издание. Москва: Мир, 2003. С. 145–146.
4. Марченко А. Л. Основы электроники: учебное пособие для вузов. Москва: ДМК Пресс, 2008. 375 с.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I / пер. с нем. Москва: ДМК Пресс, 2008. 832 с.

### References

1. 8-bit Microcontroller with 8/16/32K Bytes of ISP Flash and USB Controller. Atmel Corporation, 2010. URL: <http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc7799.pdf>
2. HEXFET Power MOSFET Datasheet IRF1310NPBF. International Rectifier, 2004. URL: <https://www.mouser.de/datasheet/2/196/irf1310npbf-1226959.pdf>
3. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
4. Marchenko A. L. Osnovy elektroniki: uchebnoe posobie dlya vuzov. Moskva: DMK Press, 2008. 375 с.
5. Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. 12-e izd. Tom I / per. s nem. Moskva: DMK Press, 2008. 832 с.

УДК 621.384.6

А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н.Г. РЕШЕТНЯК

Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

### ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ВЫХОДЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ В ГРАДИЕНТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Представлены результаты численных расчетов и экспериментальных исследований по формированию электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом. Изучено формирование пучка с энергией 55 кэВ в радиальном направлении при его транспортировке в соленоидальном магнитном поле. Исследована зависимость итогового радиального распределения на металлической мишени от амплитуды и градиента магнитного поля вдоль оси системы. Изучена возможность управления поперечными размерами пучка. Получено, что поток электронов испытывает радиальное сжатие, величина которого определяется видом градиентного магнитного поля. Построено программное средство, использование которого дало возможность промоделировать основные зависимости движения электронного пучка в заданном соленоидальном магнитном поле. На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации магнитного поля. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока. Показано, что полученные экспериментальные данные согласуются с результатами моделирования.

Ключевые слова: электронный пучок, магнетронная пушка, радиальная динамика, математическое моделирование, опытные данные.

О.С. МАЗМАНИШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК

Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна

### ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ВИХОДІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ В ГРАДІЄНТНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ: МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТ

Представлено результати чисельних розрахунків і експериментальних досліджень по формуванню электронного пучка магнетронної гарматою з вторинноемісійним катодом. Вивчено формування пучка в радіальному напрямку його при транспортуванні в соленоїдальному магнітному полі при енергії 55 кеВ. Досліджено залежність підсумкового радіального розподілу на металевій мішені від амплітуди і градієнта магнітного поля уздовж осі системи. Вивчена можливість управління поперечними розмірами пучка. Отримано, що потік електронів відчуває радіальне стиснення, величина якого визначається видом градієнтного магнітного поля. На основі моделі руху электронного потоку розглянуті характеристики результуючого электронного пучка. Показана можливість регулювання діаметра пучка шляхом варіації магнітного поля. Наводяться результати чисельного моделювання по руху трубчастого электронного потоку. Показано, що отримані експериментальні дані узгоджуються з результатами моделювання.

Ключові слова: електронний пучок, магнетронна гармата, радіальна динаміка, математичне моделювання, дослідні дані.

A.S. MAZMANISHVILI, N.G. RESHETNYAK

National Science Center "Kharkov Institute of Physics &amp; Technology", Kharkov, Ukraine

### ELECTRON BEAM DYNAMICS AT THE OUTPUT MAGNETRON GUN IN GRADIENT MAGNETIC FIELD: MODELING AND EXPERIMENT

Issues of studying electron beams of various configurations and intensities are associated with their use in electron-beam technologies, high-voltage pulsed microwave electronics, accelerator technology, etc. The range of tasks for which electron beams are applied is constantly expanding. In the NSC KIPT, studies are carried out with electron sources with cold cathodes operating in the secondary emission mode, placed in crossed electric and magnetic fields. The magnetron gun is used as an electron source. The secondary emission mechanism of beam generation, due to its weakly damaging effect on the cathode material, determines the preservation of the emission properties of the electronic source for a long time (according to estimates, up to 100 thousand hours). Based on a magnetron gun with a secondary emission cathode, an electron accelerator was created, which uses an axial electron beam to irradiate metal targets, with the prospect of irradiating an internal cylindrical surface with a radial beam. The paper presents the results of numerical calculations and experimental studies on the formation of an electron beam by a magnetron gun with a secondary emission cathode. In order to obtain precision characteristics, the formation of a beam with energy 55 keV in the radial direction during its transportation in the magnetic field of the solenoid was studied. The dependence of the final radial distribution on a metal target on the amplitude and gradient of the magnetic field along the axis of the system is investigated. The possibility of controlling the transverse

*dimensions of the beam has been studied. It was found that the electron flow undergoes radial compression, the magnitude of which is determined by the form of the gradient magnetic field. A software tool was built, the use of which made it possible to simulate the main dependences of the electron beam motion in a given solenoid magnetic field. On the basis of the electron flux motion model, the characteristics of the resulting electron beam are considered. The possibility of adjusting the beam diameter by varying the magnetic field is shown. The results of numerical simulation for the motion of a tubular electron beam are presented. It is shown that the experimental data obtained are consistent with the simulation results. It follows from the above studies that the electron flow undergoes a rearrangement of the radial distribution, which is determined by the type of gradient magnetic field in the beam transport channel. By directionally changing the configuration of the magnetic field to adjust its gradient, it is possible to control the lateral dimensions of the circular distribution of the electron beam.*

*Keywords: electron beam, magnetron gun, radial dynamics, mathematical modeling, experimental data.*

### Постановка проблемы

Вопросы изучения электронных пучков различной конфигурации и интенсивности связаны с их применением в электронно-лучевых технологиях, высоковольтной импульсной СВЧ-электронике, ускорительной технике и др. [1-4]. Круг задач, для решения которых применяются электронные пучки, постоянно расширяется. В НИЦ ХФТИ проводятся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии, помещенные в скрещенные электрические и магнитные поля. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Вторичноэмиссионный механизм генерации пучка, вследствие его слабо разрушающего действия на материал катода, обуславливает сохранение эмиссионных свойств электронного источника в течение длительного времени (согласно оценкам до 100 тыс. часов).

### Анализ последних результатов и публикаций

На основе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов, в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней [3-5], с перспективой облучения внутренней цилиндрической поверхности с помощью радиального пучка. Построено программное средство, использование которого дает возможность промоделировать основные зависимости движения электронного пучка в заданном соленоидальном магнитном поле [6, 7].

### Формулирование цели исследования

В настоящей работе приводятся результаты исследования динамики электронного пучка в канале транспортировки и результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока. Изучена возможность управления поперечными размерами электронного пучка с помощью градиентного магнитного поля.

### Основной материал

Проведены исследования по формированию электронного пучка с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в градиентном магнитном поле на экспериментальной установке [4, 5]. Для получения электронного пучка используется магнетронная пушка, которая размещается в вакуумном объеме. Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор с амплитудой плоской части импульса 20...100 kV, длительностью 50...10  $\mu$ s и частотой следования 3...10 Hz. Запуск вторичноэмиссионного размножения в пушке осуществляется импульсом напряжения с крутым спадом, который создавался генератором с амплитудой напряжения до 15 kV. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создается соленоидом, состоящим из 4-х секций. Амплитуду и продольное распределение магнитного поля можно регулировать путем изменения величины токов в катушках соленоида. Дополнительное магнитное поле в канале транспортировки пучка создается постоянным кольцевым магнитом на основе сплава  $NbFeB$  напряженностью 0.3 Т. Постоянный магнит размещен на расстоянии 70 mm от среза анода магнетронной пушки. Цилиндр Фарадея расположен посередине постоянного магнита и также может быть использован в качестве мишени. Мишени размещались на разных расстояниях от среза анода. Поперечные размеры пучка измеряются путем получения отпечатков на металлических датчиках-мишенях. Магнитное поле создавалось как соленоидом, так и совместно соленоидом и постоянным магнитом.

### Моделирование динамики частиц

Было проведено численное моделирование процесса сжатия кольцевого электронного пучка, формируемого магнетронной пушкой с помощью магнитного поля  $H_s$ , создаваемого соленоидом, и поля



$H_{SM}$ , создаваемого совместно соленоидом и постоянным магнитом. Для выполнения моделирующих расчетов построена программа, позволяющая рассчитать траектории движения электронов в заданном магнитном поле [6, 7]. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения, где  $s=ct$  ( $c$  – скорость света,  $t$  – текущее время), и ларморовским параметром задачи  $\mu$ . Таким образом, при выполнении условия  $\mu\Delta s \ll 1$  можно ожидать сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие  $\mu\Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. Потребовав выполнения заданного условия (прохождение канала транспортировки пучка) можно сформировать результирующий пучок и изучить его свойства.

При выполнении численного моделирования было выбрано модельное поле  $H(z)$  вида

$$H(z) = B(z) + \frac{A}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{\lambda}{\lambda^2 + (z - z_L)^2} \right), \quad (1)$$

где  $B(z)$  – амплитуда медленно меняющейся составляющей поля,  $A$  – амплитуда переменной составляющей,  $z_L$  – координата середины левого фронта поля,  $\lambda$  – ширина фронта поля. Тогда градиент поля в середине фронта составляет  $H'(z_L) = A/\pi\lambda$ .

Численное моделирование осуществлялось для полей  $H_S$  и  $H_{SM}$ , а также для набора промежуточных полей. При этом конфигурация поля  $H_{SM}$  характеризуется значительным положительным градиентом, а конфигурация поля  $H_S$  – градиентом небольшой величины. Это позволило промоделировать тенденции в динамике радиальных размеров пучка.

На рис. 1 показаны результаты численного моделирования движения пучка электронов (объем выборки  $N=500$  частиц) в двух магнитных полях:  $H_S$  и  $H_{SM}$  модельного вида (1) и поля, значения которого получены путем аппроксимации опытных данных. Из рисунков следует, что электронный пучок по мере движения испытывает уменьшение своих радиальных размеров, что особенно хорошо выражено в случае поля  $H_{SM}$  с большим положительным градиентом.

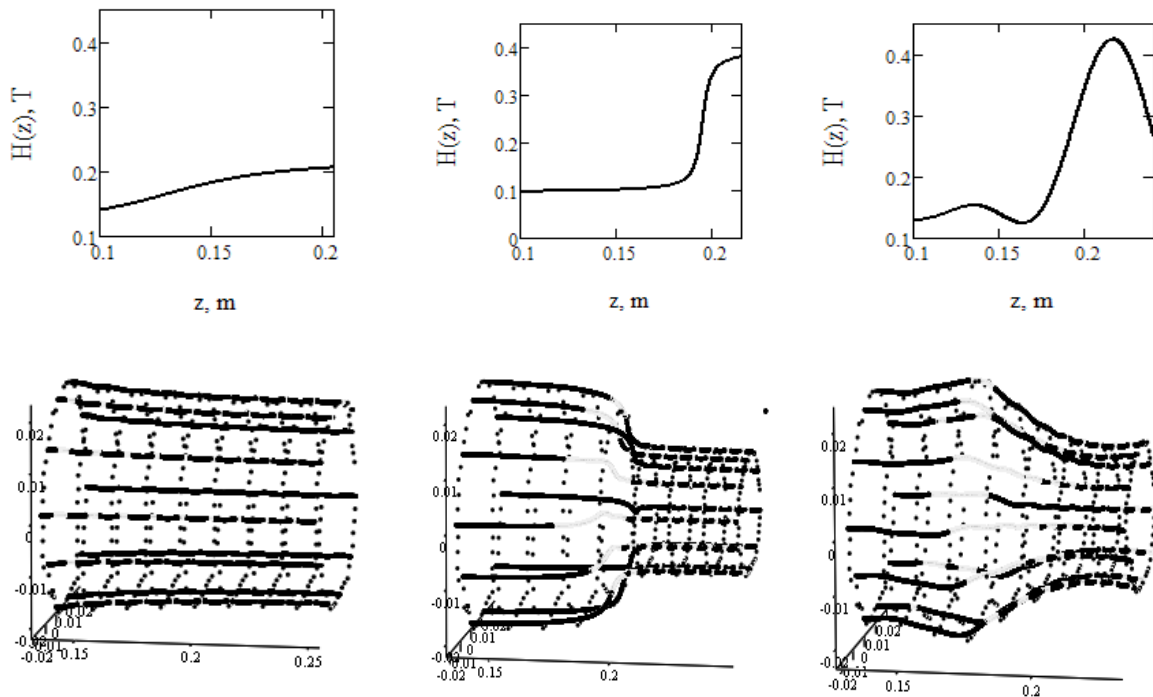


Рис. 1. Моделирование движения электронного пучка в магнитном поле.

Сверху – конфигурация магнитного поля, снизу – эскиз траекторий. Слева – движение пучка в магнитном поле  $H_S$  со слабым градиентом. Посредине – движение пучка в градиентном поле  $H_{SM}$ . Справа – движение электронного пучка в градиентном магнитном поле  $H_{SM}$ , значения которого получены путем аппроксимации опытных данных

Из рассчитанных зависимостей среднего радиального размера пучка  $\langle r \rangle$  вдоль канала транспортировки вытекает, что  $\langle r \rangle$  достигает своего минимума тем эффективнее, чем большим является градиент магнитного поля.

На рис. 2 показаны результаты численного моделирования движения электронов (число частиц в объеме выборки  $N=500$ ) в магнитных полях  $H_S$  и  $H_{SM}$ . Из рисунка можно видеть динамику формирования распределений электронного пучка при его распространении вдоль оси  $z$  в канале транспортировки. Из

рисунка випливає, що ефект зменшення поперечних розмірів електронного пучка по мірі руху особливо добре виражений в разі поля  $H_{SM}$  з позитивним градієнтом.

Розрахована залежність середнього радіального розміру пучка  $\langle r \rangle$  від виду конфігурацій магнітного поля від  $H_S$  до  $H_{SM}$ . Визначено, що середній радіальний розмір пучка  $\langle r \rangle$  для розглянутих конфігурацій полів досягає свого мінімуму тим ефективніше, чим більшою є амплітуда і градієнт експериментального магнітного поля. Локалізація точки досягнення мінімуму з ростом градієнта зміщується вздовж осі  $z$  транспортування системи.

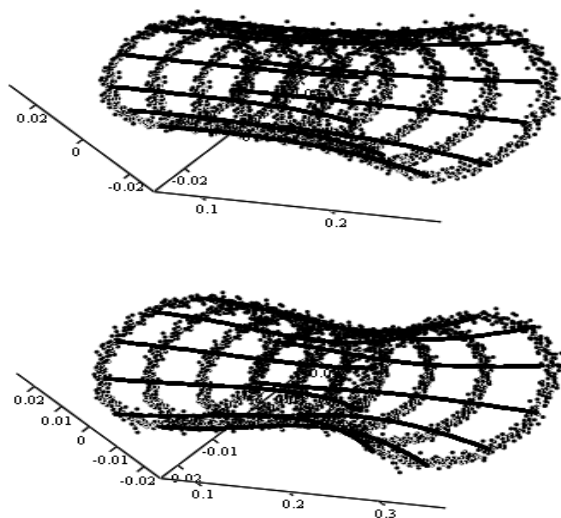


Рис. 2. Ескизи формування розподілу пучка при русі вздовж осі магнітної системи. Зверху – поле  $H_S$  со слабо-отрицательным градиентом, снизу – поле  $H_{SM}$

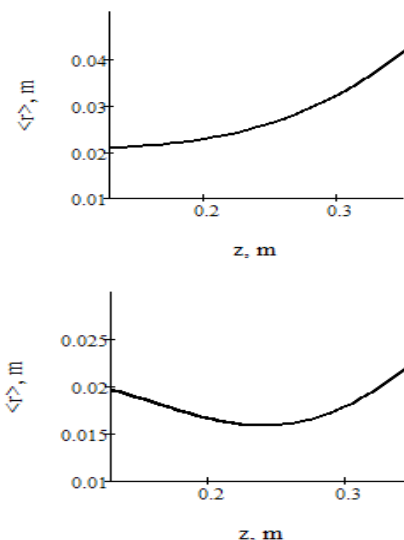


Рис. 3. Залежність мінімуму середнього радіуса пучка  $\langle r \rangle$  від продольної довжини  $z$ . Зверху – поле  $H_S$ , снизу –  $H_{SM}$

Експерименти проводились при напрузі на катоді магнетронної пушки 20-70 кВ. На Рис. 4 наведені розподіли магнітного поля вздовж осі магнетронної пушки і каналу транспортування пучка, які використовувались при проведенні досліджень.

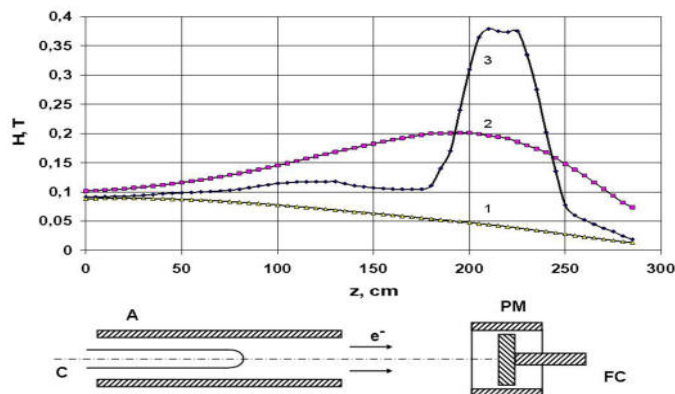


Рис. 4. Розподіли магнітних полів (криві 1-3) вздовж осі магнетронної пушки і каналу транспортування пучка, розміщення елементів пушки; А – анод, С – катод, РМ – постійний магніт, ФС – циліндр Фарадея (мишень)

На рисунках 5-7 показані основні експериментальні результати і відповідні їм дані моделюючих розрахунків. На цих рисунках показані (зверху-вниз): конфігурації соленоїдального магнітного поля (результат апроксимації експериментальних даних), залежності отримані в моделюючих розрахунках середнього радіуса  $\langle r \rangle$  пучка від продольної координати  $z$ , результати чисельного моделювання поперечного розподілу густоти частинок (площа зображення  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ ) і експериментальні відбитки електронного потоку на мішені. На рис. 5-6 відбитки пучків наведені при зменшеному масштабі зображення, а на рисунку 7 – при збільшеному.

Магнітні поля створюються як соленоїдом ( $H_S$  – рис. 4, 7, криві 1, 2), так і спільно соленоїдом і постійним магнітом ( $H_{SM}$  – крива 3). Регулюючи ток в котушці соленоїда можна створювати різні розподіли магнітних полів  $H_S$  в каналі транспортування пучка, створюючи наростаючий з градієнтом  $0.030 \text{ T/cm}$  (рис. 4, крива 2), спадаючий з градієнтом  $-0.060 \text{ T/cm}$  (рис. 4, крива 1). С допомогою



постоянного магнита в канале транспортировки пучка создается нарастающее поле  $H_{SM}$  с амплитудой 0.37 Т и градиентом 0.1 Т/см. Таким образом, движение электронов в области от постоянного магнита до мишени в поле  $H_{SM}$  происходит в условиях значительного градиента и амплитуды.

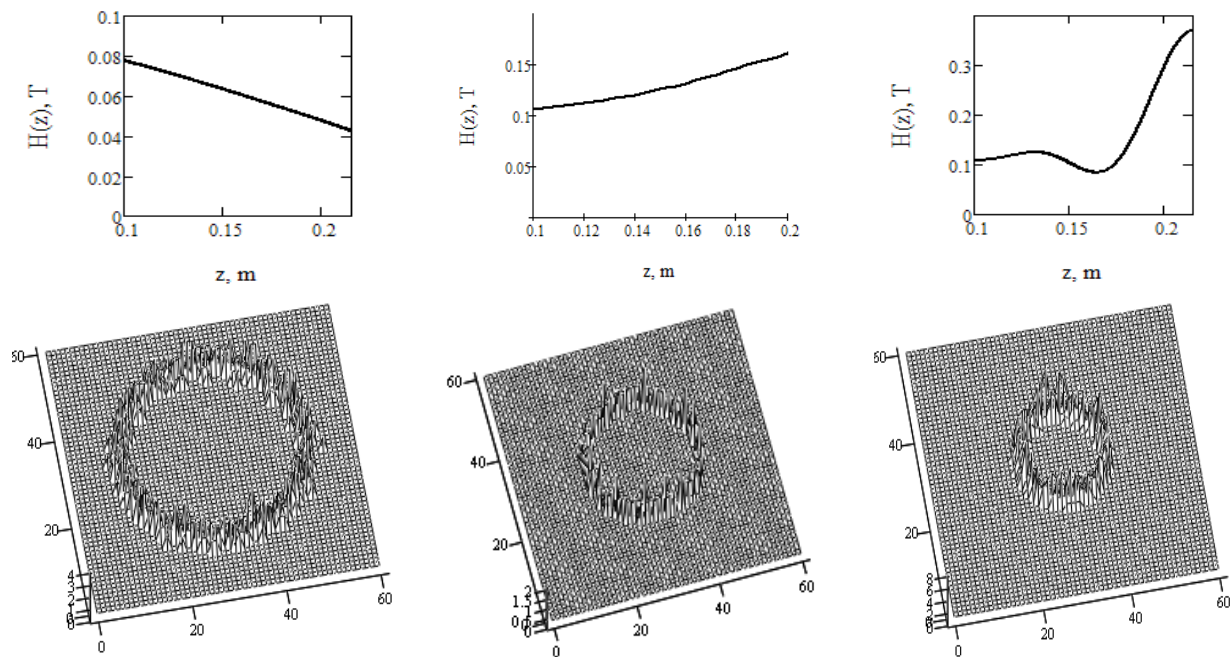


**Рис. 5.**  
Конфигурация магнитного поля  $H_S$ ,  
результат моделирования  
поперечного распределения  
плотности пучка при  $z_M=0,205$  м и  
отпечаток пучка на мишени (кривая  
2)

**Рис. 6.**  
Конфигурация квазипостоянного  
магнитного поля  $H_S$ , расчетное  
поперечное распределение плотности  
пучка при  $z_M=0,205$  м и отпечаток  
пучка на мишени (кривая 1)

**Рис. 7.**  
Конфигурация магнитного поля  
 $H_{SM}$ , расчетное поперечное  
распределение плотности пучка  
при  $z_M=0,205$  м и отпечаток пучка  
на мишени

Алюминиевая мишень располагалась на расстоянии  $z_M=0,205$  м. Измерения электронного пучка на мишенях показали, что при напряжении на катоде 55 кВ и спадающем магнитном поле  $H_S$  в области транспортировки пучка (рис. 6, кривая 2) формируется электронный пучок с наружным диаметром  $D_M=52$  мм и толщиной его стенки 3 мм. При нарастающем магнитном поле  $H_S$  (рис. 7, кривая 1) диаметр пучка составил  $D_M=30$  мм с толщиной стенки 1.5 мм. При движении электронного потока в нарастающем магнитном поле  $H_{SM}$  (рис. 7) наружный диаметр на мишени равнялся  $D_M=22$  мм с толщиной стенки 1.2 мм. При этом диаметр пучка на входе в канал транспортировки составлял 42 мм при однородном магнитном поле. Указанные значения для наружных диаметров  $D_M$  соответствуют зависимостям среднего радиуса  $\langle r \rangle$ .

### Выводы

Из приведенных исследований следует, что поток электронов испытывает перестройку радиального распределения, которое определяется видом градиентного магнитного поля в канале транспортировки пучка. На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации магнитного поля.

Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока. Показано, что полученные экспериментальные данные согласуются с результатами моделирования. Путем направленного изменения конфигурации магнитного поля с целью регулировки его градиента возможно управлять поперечными размерами кругового распределения электронного пучка.

#### Список использованной литературы

1. Engelko V.I., Mueller G., Andreev A. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proc. of 10<sup>th</sup> International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry. St.-Petersburg, Russia*, 2001.-P.-412-4172.
2. Vorogushin M.F., Glukhikh V.A., Manukyan G.S., Karpov D.A., Svin'in M.P., Ehngel'ko V.I., Yatsenko B.P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*.-2002.-№ 3.-P. 101-109.
3. Dovbnya A.N., Lavrinenko S.D., Zakutin V.V. Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*.-2011.-№ 2.-P. 39-45.
4. Garkusha O.V., Maslennikov S.P., Novozhilov A.E., Shkol'nikov E.Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proc. of the XI<sup>th</sup> International Meeting on the Use Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine. St.-Petersburg, Russia*.-2005.-P.-126.
5. Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G. Investigation of beam formation in an electron accelerator with a secondary-emission source *Visnik Kharkivskogo University, Series "Nuclei, particles, fields"*.-2006.-№ 732.-Vyp. 2(30).-P.-96-100.
6. Ayzatsky M.I., Dovbnya A.N., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P., Chertishchev I.A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations. Issue 66."* № 3(103).-2016.-P. 11-16.
7. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Chertishchev I.A. Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations."* 2015.-№ 6.-P.-77-82.

#### References

1. Engelko V.I., Mueller G., Andreev A. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proc. of 10<sup>th</sup> International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry. St.-Petersburg, Russia*, 2001.-pp.-412-4172.
2. Vorogushin M.F., Glukhikh V.A., Manukyan G.S., Karpov D.A., Svin'in M.P., Ehngel'ko V.I., Yatsenko B.P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*.-2002.-№ 3.-pp.-101-109.
3. Dovbnya A.N., Lavrinenko S.D., Zakutin V.V. Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*.-2011.-№ 2.-pp.-39-45.
4. Garkusha O.V., Maslennikov S.P., Novozhilov A.E., Shkol'nikov E.Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proc. of the XI<sup>th</sup> International Meeting on the Use Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine. St.-Petersburg, Russia*.-2005.-p.-126.
5. Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G. Investigation of beam formation in an electron accelerator with a secondary-emission source. *Visnik Kharkivskogo University, Series "Nuclei, particles, fields"*.-2006.-№ 732.-Vyp. 2(30).-pp.-96-100.
6. Ayzatsky M.I., Dovbnya A.N., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P., Chertishchev I.A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations. Issue 66."* № 3(103).-2016.-pp.-11-16.
7. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Chertishchev I.A. Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations."* 2015.-№ 6.-pp.-77-82.

УДК 004.942:537.525

І.В. МЕЛЬНИК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

А.В. ПОЧИНОК

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій,  
Університет державної фіскальної служби України

## ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ГРАНИЧНОЇ ТРАЕКТОРІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПРИФОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЛІНІЙНИМИ ТА КВАДРАТИЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧНИХ ВИРАЗІВ

У статті досліджені методи квадратичної та кусково-лінійної інтерполяції залежності радіуса електронного пучка від положення площини зрізу відносно фокальної площини за трьома заданими відліковими точками. На основі аналізу результатів інтерполяції та їх порівняння з теоретичними відомостями про проходження електронних пучків із великим кутом збіжності в іонізованому газі в умовах компенсації просторового заряду сформований метод комбінованої інтерполяції. Сутність цього методу полягає в тому, що в областях збіжності та розбіжності електронного пучка використовується кусково-лінійна інтерполяція, а в прифокальній області – квадратична. Всі аналітичні співвідношення для оцінки радіуса електронного пучка записані у вигляді арифметико-логічних виразів, що спрощує реалізацію запропонованих алгоритмів з використанням сучасних засобів логічного та матричного програмування. Отримані прості аналітичні співвідношення для оцінки положення фокуса електронного пучка та його фокального радіуса.

Ключові слова: електронний пучок, прифокальна область, поліноміальна інтерполяція, квадратична інтерполяція, кусково-лінійна інтерполяція, арифметико-логічний вираз.

І.В. МЕЛЬНИК

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

А.В. ПОЧИНОК

Институт информационных технологий, Университет государственной фискальной службы Украины

## ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ГРАНИЧНОЇ ТРАЕКТОРІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПРИФОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЛІНІЙНИМИ І КВАДРАТИЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ С ІСПОЛЬЗОВАННЯМ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧЕСКИХ ВИРАЖЕНЬ

В статье исследованы методы квадратичной и кусочно-линейной интерполяции зависимости радиуса электронного пучка от положения плоскости среза относительно фокальной плоскости по трём заданным отсчетным точкам. На основе анализа результатов интерполяции и их сравнения с теоретическими данными о прохождении электронных пучков с большим углом сходимости в ионизированном газе в условиях компенсации пространственного заряда сформирован метод комбинированной интерполяции. Сущность этого метода состоит в том, что в областях сходимости и расходимости пучка используется кусочно-линейная интерполяция, а в прифокальной области – квадратичная. Все аналитические соотношения для расчета радиуса электронного пучка записаны в виде арифметико-логических выражений, что значительно упрощает реализацию предложенных алгоритмов с использованием современных средств логического и матричного программирования. Получены простые аналитические соотношения для оценки положения фокуса электронного пучка и его фокального радиуса.

Ключевые слова: электронный пучок, прифокальная область, полиномиальная интерполяция, квадратичная интерполяция, кусочно-линейная интерполяция, арифметико-логическое выражение.

I. V. MELNYK

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnical Institute”

A. V. POCHYNOK

University of the State Fiscal Service of Ukraine,  
Educational and Research Institute of Information Technology

## INTERPOLATION OF BOUNDARY TRAJECTORY OF ELECTRON BEAM IN THE FOCAL REGION BY THE LINEAR AND SQUARE FUNCTIONS WITH USING OF ARITHMETIC-LOGICAL EXPRESSIONS

Investigation of parameters of electron beams with large convergence angle, formed in the conditions of low pressure with compensation of space charge of electrons by the ions of residual gas, is the very important task for further development of industrial electron beam technologies. Since the physical conditions of propagation of electron beams in the residual gas are very sophisticated and generally cannot be described analytically, using the methods of approximation of experimental data for solving this task is necessary.

*Especially important interpolation of boundary trajectory of electron beam, because the beam radius on different highness defined its power density, and, finally, the technological possibilities for heating treatment of metallic and ceramic items. Unfortunately, methods of interpolation of boundary trajectories of technological powerful electron beams, propagated in the residual gas, are not developed today.*

*The methods of square and piecewise-linear interpolation for dependence of electron beam radius on the position of cutting plane relative to focal plane with using three base points are considered in the article. The advantages and disadvantages both square and piecewise-linear interpolation for solved task are considered and analyzed. As the result of this investigations on the base of theoretical analyze the propagation of electron beams with large convergence angle in the ionized gas in the conditions of compensation the space charge of electrons by the positive ions the method of combined interpolation have been formed. The entity of this method is that in the regions of beam convergence and divergence the piecewise-linear interpolation is used, but in the focal region it is accurately changed to the square interpolation with corresponded slope angle in the points of joining.*

*All analytical expressions for calculation the radius of electron beam are written in the form of arithmetic-logical expressions. Such presentation is very effective and it simplified the realization of proposed algorithms with using the modern means of logic and matrix programming. Simple analytical relations for estimation the position of focus of electron beam and its focal radius have been obtained and analyzed.*

*Obtained results can be used for effective analyze of beam focal parameters in the real-time digital control systems.*

*Keywords: electron beam, focal region, polynomial interpolation, square interpolation, piecewise-linear interpolation, arithmetic-logic expression.*

### **Введение**

При выполнении сложных технологических операций с использованием электронных пучков в современных электронно-лучевых технологиях всегда важно проводить теоретические оценки параметров пучка в фокальной области и сравнивать их с экспериментальными данными [1, 2]. Это особенно важно в таких областях применения современных электронно-лучевых технологий, как сварка тонкостенных изделий [3, 4], размерная обработка [1, 5] и аддитивные технологии с наплавлением на плоскую поверхность, включая трёхмерную скульптуру [6]. Также, одним из традиционных применений мощных электронных пучков, для которого важны предварительные оценки распределения плотности тока пучка в фокальной области, является сварка-пайка металлических изделий малой толщины с разной температурой плавления [4, 7]. Предсказание закономерности изменения распределения плотности тока электронного пучка позволяет в значительной степени оптимизировать нагрев изделия под его воздействием с учетом реальных энергетических параметров, что достигается за счет расположения изделия под заданным углом к оси симметрии пучка. Такие оценки особенно важны для нетрадиционных источников электронов, работающих в сложных физических условиях низкого вакуума, в частности, для источников, работающих на основе высоковольтного тлеющего разряда, а также для плазменных источников электронов [8]. Основной особенностью моделирования технологических электронных пучков, формируемых газоразрядными и плазменными источниками электронов, является то, что формирование и транспортировка пучка осуществляется в низком и среднем вакууме, в условиях полной или частичной компенсации пространственного заряда электронов положительно заряженными ионами остаточного газа [8]. Характерной особенностью электронных пучков, формируемых источниками электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда, является также большой угол сходимости пучка, поскольку, вследствие относительно малого значения плотности тока вторичной ионно-электронной эмиссии, получение интенсивных электронных пучков в разрядах низкого давления возможно только с развитой эмиссионной поверхностью катода [3, 7, 8].

Тем не менее, за исключением монографии [1], опубликованной ещё в семидесятые годы XX века, теоретические оценки параметров технологических электронных пучков не проводились. Эти оценки достаточно точные и их актуальность не утрачена на сегодняшний день, однако они основаны на детерминированном анализе физических особенностей генерации пучков и не учитывают возможность статистического отклонения их параметров. Кроме того, для сложного технологического оборудования и сложных физических условий низкого вакуума, особенности генерации и формирования электронного пучка могут быть не всегда известны. А статистические оценки, аналогичные, приведенные в работе [2], выполнялись для интенсивных пучков высоких энергий, которые используются в радиационно-технологических центрах.

Поэтому целью данной статьи является поиск методики интерполяции радиуса электронного пучка с относительно большим углом сходимости в зависимости от положения анализируемой плоскости среза относительно фокальной плоскости. Такая постановка задачи имеет особенно существенное значение для анализа геометрических параметров электронных пучков, формируемых технологическими источниками электронов разного типа.



### Постановка задачи

В общем виде задача интерполяции радиуса сходящегося электронного пучка в зависимости от положения анализируемой плоскости среза сводится к следующему. Необходимо определить минимальное количество базовых отсчетных точек и выбрать соответствующий метод интерполяции [9]. Тут следует иметь в виду, что число отсчетных точек для выбранного метода интерполяции должно быть минимальным, поскольку увеличение их количества приводит к значительному усложнению методики проведения экспериментальных измерений. Также при построении методики интерполяции необходимо помнить о том, что электронный пучок сходится только до фокальной плоскости, а затем, за её пределами, он расходится под тем же углом  $\alpha$  [10]. В соответствии с такой постановкой задачи интерполяции необходимо искать функцию  $r(h)$ , имеющую один глобальный минимум. При такой постановке для решения поставленной задачи можно использовать известные алгоритмы решения экстремальных задач [11]. Кроме того, для искомой функции  $r(h)$  в области минимума, расположенного в фокальной плоскости пучка и имеющего координату  $h_{\text{ф}}$ , всегда выполняется следующее условие [10]:

$$\frac{dr(h_{\text{ф}} - \delta h)}{dh} = -\frac{dr(h_{\text{ф}} + \delta h)}{dh}, \quad (1)$$

где  $\delta h$  – бесконечно малое изменение величины  $h$ . Физический смысл соотношения (1) состоит в том, что в окрестности фокуса пучка его граничная траектория симметрична относительно его фокальной плоскости.

Поэтому поставим задачу следующим образом. Будем решать обобщённую задачу кусочно-линейной и квадратичной интерполяции граничной траектории электронного пучка по заданным трём отсчетным точкам. Необходимым условием для корректности такой постановки задачи является то, что две точки должны располагаться по одну сторону от фокуса пучка, а одна – по другую, то есть, геометрическое положение фокуса пучка должно лежать в интервале

$$h_1 < h_{\text{ф}} < h_3, \quad (2)$$

где  $h_1$  – крайняя левая отсчетная точка по высоте  $h$ , а  $h_3$  – крайняя правая точка [10]. Ниже будет показано, что для кусочно-линейной интерполяции условие (2) выполняется не всегда. В случае невыполнения этого условия считается, что метод расходится и необходимо, не меняя исходных отсчетных точек, изменить алгоритм интерполяции. Геометрическая интерпретация решаемой задачи интерполяции в общем виде представлена на рис. 1. Видно, что положение фокуса электронного пучка при решении задач кусочно-линейной интерполяции  $h_{\text{фл}}$  и квадратичной интерполяции  $h_{\text{фп}}$  может существенно отличаться. Ещё в большей степени могут отличаться соответствующие фокальные радиусы электронного пучка  $r_{\text{фл}}$  и  $r_{\text{фп}}$ . Эффективное решение этой проблемы для поставленной задачи интерполяции будет рассмотрено далее.

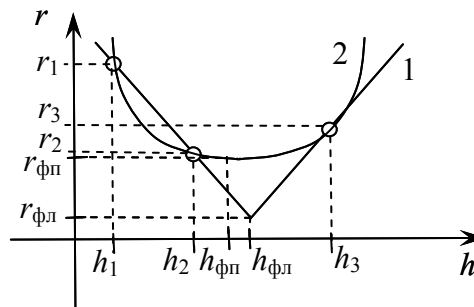


Рис. 1 Геометрическая интерпретация метода кусочно-линейной (1) и квадратичной (2) интерполяции граничной траектории электронного пучка

Также из рис. 1 видно, что для кусочно-линейной интерполяции значения интерполяционной функции задаются на отдельных числовых интервалах. Для описания таких функций может быть успешно использован математический аппарат, связанный с формированием и анализом арифметико-логических выражений. Такой подход является очень эффективным с точки зрения обеспечения возможностей реализации предлагаемых вычислительных алгоритмов в современных системах программирования, а также в компьютерных системах, предназначенных для проведения инженерных и научно-технических расчетов [12].

Рассмотрим основные особенности решения задачи интерполяции граничной траектории электронного пучка по трём отсчетным точкам с использованием методов квадратичной и кусочно-линейной интерполяции.

### Метод квадратичной интерполяции граничной траектории электронного пучка

Для поиска квадратичной функции интерполяции граничной траектории электронного пучка по трём заданным отсчётным точкам с координатами  $(h_1, r_1)$ ,  $(h_2, r_2)$  и  $(h_3, r_3)$  необходимо решить следующую систему из трёх алгебраических уравнений с тремя неизвестными  $C_{\text{п1}}$ ,  $C_{\text{п2}}$  и  $C_{\text{п3}}$ , которые являются искомыми коэффициентами квадратичного интерполяционного полинома:

$$\begin{cases} C_{п2}h_1^2 + C_{п1}h_1 + C_{п0} = r_1; \\ C_{п2}h_2^2 + C_{п1}h_2 + C_{п0} = r_2; \\ C_{п3}h_3^2 + C_{п1}h_3 + C_{п0} = r_3. \end{cases} \quad (3)$$

Для упрощения аналитического решения системы уравнений (3) введём дополнительную переменную  $k$ , которая непосредственно связана с углом наклона граничной траектории пучка  $\alpha$ :

$$k = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{r_1 - r_2}{h_1 - h_2}. \quad (4)$$

Тогда решение системы уравнений (3) методом исключения переменных, с учетом подстановки (4), даёт следующий результат:

$$C_{п2} = \frac{r_3h_2 - r_3h_1 - r_1h_2 + r_2h_1 + r_1h_3 - r_2h_3}{h_3h_1^2 + h_1h_2^2 - h_3h_2^2 - h_1h_3^2 - h_2h_1^2 + h_2h_3^2}, \quad C_{п1} = k - \frac{h_1 + h_2}{C_{п2}}, \quad C_{п0} = r_1 - kh_1 + C_{п2}h_1h_2. \quad (5)$$

С учетом формул (5) и исходной системы уравнений (3), для положения фокуса электронного пучка  $h_{фп}$  и для радиуса пучка в фокусе  $r_{фп}$  можно записать следующие аналитические соотношения:

$$h_{фп} = \frac{1}{2} \left( h_1 + h_2 - \frac{k}{C_{п2}} \right), \quad r_{фп} = C_{п2}h_{фп}^2 + C_{п1}h_{фп} + C_{п0}. \quad (6)$$

Анализ результатов интерполяции граничной траектории электронного пучка с использованием соотношений (3 – 5) и определения его фокальных параметров с использованием соотношений (6) будет проведен в следующем разделе статьи.

#### Метод кусочно-линейной интерполяции граничной траектории электронного пучка и предварительная оценка результатов расчетов для разных методов интерполяции

Как видно из рис. 1, функция кусочно-линейной интерполяции граничной траектории электронного пучка по трём отсчетным точкам представляется в виде двух прямых линий, которые пересекаются в точке  $(h_{фл}, r_{фл})$  с учетом выполнения условия (1). Такая кусочно-линейная функция может быть записана в виде следующего арифметико-логического выражения [12]:

$$r_1(h) = (h \leq h_{фл}) \cdot (C_{л1}h + C_{л01}) + (h > h_{фл}) \cdot (C_{л02} - C_{л1}h), \quad (7)$$

где  $C_{л01}$ ,  $C_{л02}$  и  $C_{л1}$  – коэффициенты интерполяционной функции, заданной арифметико-логическим выражением (7).

Проблема практической реализации такой интерполяции состоит в том, что заранее неизвестно, какие из двух заданных точек лежат на одной прямой, а через какую точку прямая проводится симметрично в обратном направлении, с учетом условия (1). Поэтому, в общем случае, для решения задачи кусочно-линейной интерполяции граничной траектории электронного пучка по трём отсчетным точкам используется одна из двух следующих систем линейных уравнений:

$$\begin{cases} C_{л1}h_1 + C_{л01} = r_1; \\ C_{л1}h_2 + C_{л01} = r_2; \\ C_{л02} - C_{л1}h_3 = r_3, \end{cases} \quad (8)$$

если слева от фокуса лежат точки  $(h_1, r_1)$  и  $(h_2, r_2)$ , или

$$\begin{cases} C_{л1}h_1 + C_{л01} = r_1; \\ C_{л02} - C_{л1}h_2 = r_2; \\ C_{л02} - C_{л1}h_3 = r_3, \end{cases} \quad (9)$$

если справа от фокуса лежат точки  $(h_2, r_2)$  и  $(h_3, r_3)$ .

В случае, если порядок обхода точек выбран неправильно, положение фокуса не удовлетворяет условию (1), то есть, можно сказать, что метод кусочно-линейной интерполяции граничной траектории электронного пучка в этом случае расходится [9]. Допустим, что такое произошло при решении системы уравнений (8). Тогда, для перехода к системе уравнений (9), необходимо выполнить следующие действия.

1. Поменять местами точки  $(h_1, r_1)$  и  $(h_3, r_3)$ . То есть предположить, что:

$$h_1 = h_3; \quad h_3 = h_1; \quad r_1 = r_3; \quad r_3 = r_1. \quad (10)$$

2. Записать арифметико-логическую функцию в другом виде, поменяв в ней порядок вычисления арифметических выражений:

$$r_2(h) = (h \leq h_{фл}) \cdot (C_{л02} - C_{л1}h) + (h > h_{фл}) \cdot (C_{л1}h + C_{л01}). \quad (11)$$

Алгоритм, заданный соотношениями (1), (10), (11), также можно записать в виде арифметико-логического выражения, используя понятие вектора-функции, приведенное в работе [12]. Оно состоит в том, что элементами вектора могут быть не только числовые значения, но и функции. Вычисление векторов-функций эффективно реализовано в системе научно-технических расчетов MatLab средствами матричного программирования [12]. Для рассматриваемого случая можно записать:

$$r_{\text{л}}(h) = (h_1 \leq h_{\text{фл}} < h_3) \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_3 \\ r_1 \\ r_3 \\ r_1(h, h_{\text{фл}}) \end{pmatrix} + ((h_{\text{фл}} \geq h_3) \vee (h_{\text{фл}} < h_1)) \cdot \begin{pmatrix} h_3 \\ h_1 \\ r_3 \\ r_1 \\ r_2(h, h_{\text{фл}}) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи кусочно-линейной интерполяции достаточно решить систему уравнений (8), а арифметико-логическую функцию вычислять с использованием соотношения (12). Решение системы (8) можно представить в виде:

$$C_{\text{л1}} = k; C_{\text{л01}} = r_2 - k \cdot h_2; C_{\text{л02}} = r_3 + k \cdot h_3. \quad (13)$$

где коэффициент  $k$  определяется соотношением (4).

Тогда, решая систему уравнений (8), получаем следующие соотношения для положения фокуса пучка и его фокального радиуса:

$$h_{\text{фл}} = \frac{1}{2} \cdot \left( h_3 + h_2 + \frac{r_3 - r_2}{k} \right); \quad r_{\text{фл}} = \frac{kh_2 + 3 \cdot (r_3 + k \cdot h_3)}{2} - r_2. \quad (14)$$

С учетом известного определения функции модуля, а также формул (14), в рассматриваемом случае арифметико-логические выражения (7), (11), описывающие функцию линейной интерполяции, можно переписать в упрощенной форме:

$$r_{\text{л3}}(h) = |k(h - h_{\text{фл}})| + r_{\text{фл}}, \quad (15)$$

тогда соотношение (12) тоже значительно упрощается и записывается в виде:

$$r_{\text{л}}(h) = (h_1 \leq h_{\text{фл}} < h_3) \cdot \left( r_{\text{л3}}(h, h_{\text{фл}}(h_3, r_3), r_{\text{фл}}(h_3, r_3)) \right) + ((h_{\text{фл}} \geq h_3) \vee (h_{\text{фл}} < h_1)) \cdot \left( r_{\text{л3}}(h, h_{\text{фл}}(h_1, r_1), r_{\text{фл}}(h_1, r_1)) \right) \quad (16)$$

Результаты интерполяции граничной траектории электронного пучка для разных наборов отсчетных точек, полученные с использованием соотношений (5), (6) и (14) – (16), приведены на рис. 2, а соответствующие этим наборам координаты отсчетных точек – в таблице 1. На рис. 2, а, приведены результаты для набора значений 1, а на рис. 2, б – для набора 2.

Таблица 1.

| № набора | Значения $h$ , мм |       |       | Значения $r$ , мм |       |       |
|----------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|          | $h_1$             | $h_2$ | $h_3$ | $r_1$             | $r_2$ | $r_3$ |
| 1.       | 1,3               | 1,1   | 1,5   | 1,3               | 1,1   | 1,5   |
| 2.       | 1,2               | 1,4   | 1,9   | 1,3               | 1,1   | 1,5   |

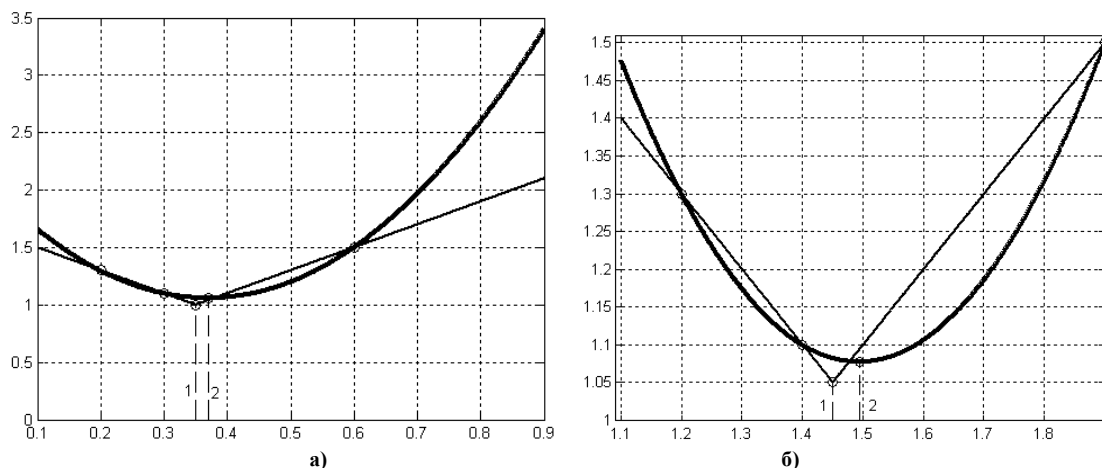


Рис. 2 Результаты кусочно-линейной и квадратичной интерполяции граничной траектории электронного пучка. Показаны отсчетные точки, а также положение фокуса пучка для кусочно-линейной (1) и квадратичной (2) интерполяции

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы относительно точности оценок параметров электронных пучков с большим углом сходимости, транспортируемых в низком вакууме в ионизированном газе. Результаты экспериментов по прохождению электронных пучков в таких физических условиях показали, что угол сходимости пучка остаётся практически неизменным вплоть до прифокальной области, а возле фокуса направление

траекторий меняется и функция  $r(h)$  имеет глобальный минимум, в котором производная  $\frac{dr(h_{\text{фл}})}{dh} = 0$ .

Такой характер функции объясняется тем, что при дрейфе электронов в отсутствие электрического поля их пространственный заряд компенсируется ионами газа и они испытывают незначительное ускорение по радиальной координате только в области фокуса пучка, при этом всегда выполняется условие (1) [10]. В связи с этим квадратичную интерполяцию, для которой угол сходимости и расходимости пучка изменяется во всём диапазоне изменения продольной координаты  $h$ , нельзя считать адекватной. Что касается положения фокуса электронного пучка, то его тоже точнее отражает кусочно-линейная интерполяция, и оценки, сделанные с использованием соотношений (14), можно считать достаточно корректными. Существенным недостатком этого вида интерполяции является только то, что в прифокальной области происходит резкое изменение направления движения электронов, а в точке  $h_{\text{фл}}$

производная функции  $\frac{dr_{\text{лз}}(h_{\text{фл}})}{dh}$  не определена, поскольку  $\left. \frac{dr_{\text{лз}}(h_{\text{фл}})}{dh} \right|_{-0} = \alpha$ , а  $\left. \frac{dr_{\text{лз}}(h_{\text{фл}})}{dh} \right|_{+0} = -\alpha$ .

Такая характерная особенность является общей для всех функций вида  $f(x) = |C_1(x - C_2)| + C_3$ , имеющих экстремум в точке с координатами  $(C_2, C_3)$ . Отсутствие производной в характерной точке функции, определяющей положение фокуса пучка, в некоторых случаях может привести к расходимости численных алгоритмов, по которым проводится вычисление удельной мощности пучка в фокальной области и оцениваются его технологические возможности [1]. В связи с этим был предложен и исследован комбинированный метод интерполяции граничной траектории электронного пучка, сущность которого состоит в том, что, хотя он основан на кусочно-линейной интерполяции, в прифокальной области она заменяется на квадратичную. Описание этого метода приводится в следующем разделе статьи.

#### Метод комбинированной линейно-квадратичной интерполяции граничной траектории электронного пучка

Метод комбинированной интерполяции представляет собой следующую последовательность действий.

1. В соответствии с описанной выше методикой проводится кусочно-линейная интерполяция.
2. Из заданного набора значений  $(h_1, r_1)$ ,  $(h_2, r_2)$  и  $(h_3, r_3)$  выбирается точка, в которой значение  $r$  является минимальным, то есть, с точки зрения теории решения экстремальных задач, ищем значение  $r_k = \min(r_1, r_2, r_3)$  [11]. Этот пункт алгоритма можно формализовать с использованием математического аппарата арифметико-логических выражений следующим образом [12]:

$$\begin{pmatrix} h_k \\ r_k \end{pmatrix} = ((r_1 \leq r_2) \wedge (r_1 \leq r_3)) \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ r_1 \end{pmatrix} + ((r_2 \leq r_1) \wedge (r_2 \leq r_3)) \cdot \begin{pmatrix} h_2 \\ r_2 \end{pmatrix} + ((r_3 \leq r_1) \wedge (r_3 \leq r_2)) \cdot \begin{pmatrix} h_3 \\ r_3 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

3. Из найденной точки с координатами  $(h_k, r_k)$  проводится парабола, уравнение которой сначала запишем в общем виде:

$$p(h) = C_{k2}h^2 + C_{k1}h + C_{k0}, \quad (18)$$

где  $C_{k2}$ ,  $C_{k1}$  и  $C_{k0}$  – коэффициенты интерполяционного полинома  $p(h)$ .

Для сформулированной задачи комбинированной интерполяции граничной траектории электронного пучка особенностью интерполяционного полинома  $p(h)$ , заданного соотношением (18), является то, что его производная в точке  $(h_k, r_k)$  равна  $k$ , где значение  $k$  определяется формулой (4). Третьим условием, определяющим функцию  $p(h)$  для решаемой задачи интерполяции, является то, что вершина параболы соответствует координате  $h_{\text{фл}}$ , определяемой соотношением (14). Тогда для решаемой задачи квадратичная функция  $p(h)$ , с учетом формул (4, 14, 18), однозначно определяется следующей системой линейных уравнений относительно коэффициентов  $C_{k2}$ ,  $C_{k1}$  и  $C_{k0}$ :

$$C_{k2}h_k^2 + C_{k1}h_k + C_{k0} = r_k, \quad \left. \frac{dp}{dh} \right|_{h=h_k} = 2C_{k2}h_k + C_{k1} = k, \quad \frac{C_{k1}}{2C_{k2}} = -h_{\text{фл}}. \quad (19)$$

Решение системы уравнений (19) можно записать следующим образом:



$$C_{k2} = \frac{k}{2(h_k - h_{\text{фл}})}, \quad C_{k1} = k \cdot \left(1 - \frac{h_k}{2(h_k - h_{\text{фл}})}\right), \quad C_{k0} = r_k - C_{k2}h_k^2 - C_{k1}h_k. \quad (20)$$

Тогда искомая функция комбинированной интерполяции  $r_{\text{кб}}(h)$  может быть записана в виде следующего арифметико-логического выражения:

$$r_{\text{кб}}(h) = ((h > h_k) \vee (h < (2h_{\text{фл}} - h_k))) \cdot p(h) + ((h \leq h_k) \vee (h \geq (2h_{\text{фл}} - h_k))) \cdot r_{\text{л3}}(h), \quad (21)$$

где функция  $p(h)$  определяется соотношениями (4, 14, 17, 18, 20), а функция  $r_{\text{л3}}(h)$  – соотношениями (4, 14, 15). Фокальный радиус электронного пучка  $r_{\text{фк}}$  для метода комбинированной интерполяции может быть вычислен с использованием соотношения (18) как  $p(h_{\text{фк}})$ . Из теории полиномиальных функций очевидно, что  $r_{\text{фк}} > r_{\text{фл}}$ , то есть, кусочно-линейная интерполяция всегда даёт несколько заниженное значение фокального радиуса пучка. Графические зависимости для результатов квадратичной, кусочно-линейной и комбинированной интерполяции, полученные для наборов значений 1 и 2, приведенных в таблице 1, представлены на рис. 3.

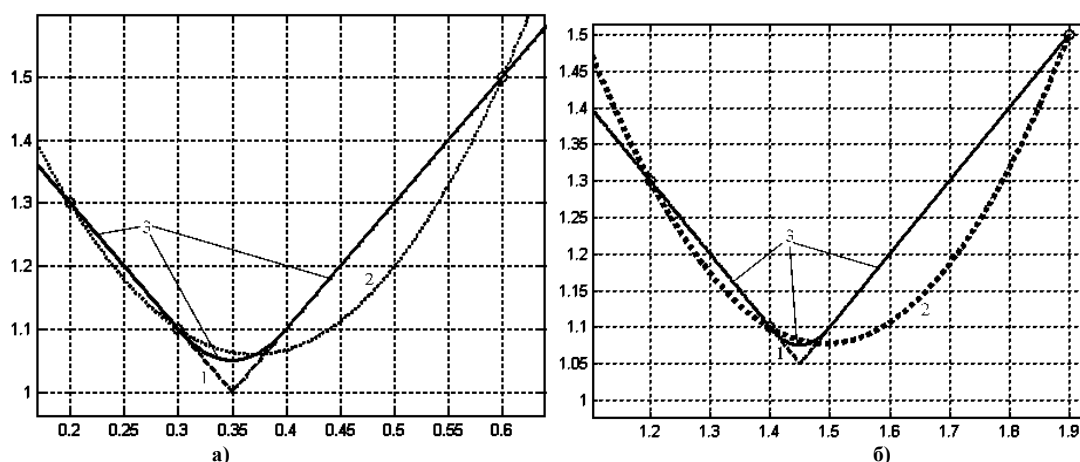


Рис. 3 Результаты кусочно-линейной (1), квадратичной (2) и комбинированной (3) интерполяции граничной траектории электронного пучка для наборов значений 1 (а) и 2 (б), заданных в таблице 1

### Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты расчетов показали, что из трёх рассмотренных в статье методов комбинированная интерполяция наилучшим образом описывает граничную траекторию электронного пучка с большим углом сходимости и позволяет проводить предварительные оценки его фокальных параметров. Кусочно-линейная интерполяция за пределами фокальной области даёт одинаковые значения с методом комбинированной интерполяции, однако при этом комбинированная интерполяция значительно точнее описывает прохождение пучка в фокальной области. Поскольку проведенные исследования показали, что квадратичная интерполяция не обеспечивает повышение точности, очевидно, что дальнейшее увеличение количества расчетных точек и повышение порядка интерполяционного полинома не имеет особого смысла [9, 12]. Полученные результаты могут быть объяснены физическими процессами, связанными со свободным дрейфом электронных пучков в ионизированном газе [10]. Дальнейшие исследования данной проблемы могут быть связаны с поиском других, не полиномиальных функций интерполяции, путём аналитического решения уравнения дрейфа в упрощенной форме и сравнения результатов моделирования с фотографиями электронных пучков, проходящих в ионизированном газе. Полученные результаты могут быть использованы для анализа фокальных параметров электронных пучков, формируемых источниками электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда [3, 8]. Ценность полученных результатов с практической точки зрения состоит в том, что при адекватности описания граничной траектории пучка они достаточно просты и полученные аналитические соотношения могут быть использованы в микроконтроллерных системах управления технологическими процессами. Переход к более сложным методам интерполяции, например к сплайнам, значительно усложняет вычислительные процедуры, что ведёт к существенному увеличению времени счета задачи [9]. В предлагаемом подходе используются интервальные оценки, которые формируются на основе арифметико-логических выражений, а из теории алгоритмов известно, что операции сравнения вычислительные устройства всегда выполняют намного быстрее, чем арифметические операции и операции перемещения данных [12].

**Выводы**

Предложенный в статье метод комбинированной интерполяции граничной траектории электронного пучка при его прохождении в ионизированном газе является простым и достаточно эффективным для практического использования. Несомненным достоинством предложенного метода является то, что все аналитические соотношения записаны с использованием арифметико-логических выражений, а именно такой подход к составлению алгоритмов является наиболее эффективным с точки зрения его программной реализации с использованием современных средств логического и матричного программирования. Простота математического аппарата позволяет использовать данный метод в микроконтроллерных системах управления технологическими процессами. Полученные результаты представляют большой теоретический и практический интерес для разработчиков современного электронно-лучевого технологического оборудования.

**Список использованной литературы**

1. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Москва: Машиностроение, 1978. 239 с.
2. Починок А.В. Сравнение вычислительных методов определения энергии электронов по результатам дозиметрии. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. №890. 2010. С. 187 – 194.
3. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.
4. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. Электронно-лучевая сварка. / Под общ. научн. ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
5. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. / Москва: Энергия, 1980. 528 с.
6. Kovalchuk D., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B. Prospects of application of gas discharge electron beam guns in additive manufacturing. *Electrotechnics and electronics*, № 5-6. 2016. P. 36 – 42.
7. Безрадетский А.В., Василенко А.И., Денбовецкий С.В., Мельник В.И. Электронно-лучевая сварка профильными электронными пучками. *Электронная промышленность*. вып. 4. 1988. С. 20 – 23.
8. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. Москва: Атомиздат, 1989. 256 с.
9. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб. пособие для вузов. Москва: Наука, 1989. 432 с.
10. Силадьи М. Электронная и ионная оптика. Москва: Мир, 1990. 640 с.
11. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: Учебное пособие для вузов. Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит, 1988. 552 с.
12. Мельник И.В. Анализ возможностей использования матричных макроопераций системы MatLab при решении прикладных задач. *Электронное моделирование*. №3. 2009. С. 37 – 51.

**References**

1. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Osnovy elektronno-luchevoi obrabotki materialov. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 239 s.
2. Pochynok A.V. Sravnenie vychislitel'nyh metodov opredeleniya energii elektronov po rezul'tatam dozimetrii. *Visnyk Harkivs'kogo natsional'nogo technichnogo universytetu imeni V.N. Karazina. Seriya "Matematichne modeliuvannya. Informatsiyni Tehnologii. Avtomatyzovani systemy unravlinny"*. 2010. #890. S. 187-194.
3. Novikov A.A. Istochniki elektronov vysokovoltного tleyushego razryada s anodnoi plasmoy. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 96 s.
4. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A., Kovbasenko S.N. Elektronno-luchevaya svarka. / Pod obsch. nach. red. B.E. Patona. Kyiv: Naukova dumka, 1987. 256 s.
5. Shiller Z., Haizig U., Pantser Z. Elektronno-luchevaya tehnologiya. Moscow: Energiya, 1980. 528 s.
6. Kovalchuk D., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B. Prospects of application of gas discharge electron beam guns in additive manufacturing. *Electrotechnics and electronics*. № 5-6. 2016. P. 36 – 42.
7. Bezratetskiy A.V., Vasilenko A.I., Denbnovietskiy S.V., Melnik V.I. Elektronno-luchevaya svarka profil'nymi elektronnyimi puchkami. *Elektronnaia promyshlennost'*. vyp. 4. 1988. S. 20 – 23.
8. Zavialov M.A., Kreindel Yu. E., Novikov A.A., Shanturin L.P. Plazmennye processy v technologicheskikh elektronnykh pushkah. Moscow: Atomizdat, 1989. 256 s.
9. Samarskiy A.A., Guln A.V. Chislennye metody: ucheb. Posobie dlya vuzov. Moscow: Nauka, 1989. 432 s.
10. Siladii M. Elektronnaia i ionnaya optika. Moscow, Mir. 1990. 640 s.
11. Vasiliev F.P. Chislennye metody resheniya ekstremal'nykh zadach: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit, 1988. 552 s.
12. Melnik I.V. Analiz vozmozhnostey ispolzovaniya matrichnykh makrooperatsiy sistemy MatLab dlya resheniya prikladnykh zadach. *Elektronnoie modelirovanie*. #3. 2009. S. 37 – 51.

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 004.942

С.В. ВОРОНЕНКО, І.М. ЩЕНКО

Херсонська державна морська академія

Г.В. РУДАКОВА, Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО

Херсонський національний технічний університет

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУДНОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ**

*У статті розглянуто особливості сучасних систем утилізації тепла вихлопних газів, їх режимів й умов роботи. Обґрунтовано можливість підвищення ефективності роботи складного комплексу за рахунок удосконалення системи керування режимами генерування та постачання електричної енергії. Проведено аналіз структури комплексних турбокомпресорних установок, розглянуто взаємозв'язки між окремими компонентами та наведено відповідні математичні моделі, що описують динаміку їх роботи. Виявлено вхідні, вихідні та внутрішні фактори, що впливають на роботу комплексу. Математична модель, яка будується з розглянутих моделей компонентів, надає можливість аналізувати процеси, що протікають в системі, та оцінювати ефективність методів керування, що розроблюються.*

*Ключові слова: утилізація вторинних ресурсів, турбокомпресорна установка, асинхронна машина, система відбору потужності, система керування режимами.*

С.В. ВОРОНЕНКО, И.М. ИЩЕНКО

Херсонская государственная морская академия

А.В. РУДАКОВА, Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО

Херсонский национальный технический университет

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ТУРБОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ**

*В статье рассмотрены особенности современных систем утилизации тепла выхлопных газов, их режимов и условий работы. Обоснована возможность повышения эффективности работы сложного комплекса за счет совершенствования системы управления режимами генерации и поставки электроэнергии. Проведен анализ структуры комплексных турбокомпрессорных установок, рассмотрены взаимосвязи между отдельными компонентами и приведены соответствующие математические модели, описывающие динамику их работы. Выявлено входящие, исходящие и внутренние факторы, влияющие на работу комплекса. Математическая модель, которая строится из рассмотренных моделей компонентов, позволяет анализировать процессы, протекающие в системе, и оценивать эффективность разрабатываемых методов управления.*

*Ключевые слова: утилизация вторичных ресурсов, турбокомпрессорная установка, асинхронная машина, система отбора мощности, система управления режимами.*

S.V. VORONENKO, I.M. ISCHENKO

Kherson State Maritime Academy

H.V. RUDAKOVA, Yu.O. LEBEDENKO

Kherson National Technical University

**MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX SHIPBOARD POWER PLANT  
WITH TURBOCHARGER**

*In the article features of modern systems of utilization of heat of exhaust gases, their modes and working conditions are considered. Based on the analysis of modern exhaust gas utilization systems, it has been proved that taking into account the peculiarities of the operation and modes of the ship's power plant, in particular the problems of providing overload during operation on low-speed modes, is possible due to the use of integrated turbo-compressor units with an electric machine and a frequency converter. Such plants, due to the corresponding change in the mode of operation of the electric machine, can generate electricity from the waste heat utilization of the main engine, or, in the absence of compressor power, the supercharging can be carried out by transferring the generator to the engine mode when powered from the ship's power system. The purpose of the research is to construct a mathematical model of a complex turbocharger with an electric machine and a frequency converter as an object of control, which will allow to analyze the processes occurring in the system*

*and evaluate the effectiveness of the developed control methods. The possibility of increasing the efficiency of complex complex work due to the improvement of the control system of generation and supply of electric energy is substantiated. The analysis of the structure of complex turbine compressor plants is carried out, the interrelations between the individual components are considered and the corresponding mathematical models describing the dynamics of their work are presented. The complex consists of separate subsystems: the main diesel power plant with turbocharging; system of automatic adjustment of the rotational speed of the main motor shaft; power takeoff system. The input, output and internal factors that influence the work of the complex are revealed. The input factors acting on the object is the signal of the task of the rotational speed of the shaft of the main engine, which is given by the operator-operator and corresponds to the required speed of the vessel; the moment of the propeller's resistance, which depends essentially on the speed of the shaft (speed of the vessel) and external factors, namely: sea excitement, depth, degree of climbing of the body, etc. To the output factors include the following: the rotational speed of the main motor shaft; the power is selected and transmitted to the ship's electrical grid or is added from the ship's electrical grid. The control variables include the following variables: the value of the displacement of the fuel rejection; frequency of rotation of the turbine; logical control of the keys of the frequency converter. The mathematical model, which is constructed from the component models under consideration, provides an opportunity to analyze the processes occurring in the system and to evaluate the effectiveness of the developed control methods.*

*Keywords: waste-heat recovery system, turbocharger compressor, asynchronous machine, power take-off system, mode control system.*

### Постановка проблеми

Розвиток сучасних морських суден різного призначення характеризується вирішенням питань, спрямованих на удосконалення двигунів і суден у цілому, економії палива, повноти використання його енергії, застосування оптимізованих режимів роботи енергетичних установок, автоматизації технологічних процесів, впровадження сучасних систем навігації й управління. Успішне вирішення більшості з відзначених завдань неможливо без надійного та безперебійного живлення обладнання суден електроенергією відповідної якості. У зв'язку з цим, у сучасній судновій електроенергетиці особливу увагу приділяють удосконаленню систем генеруванню електроенергії, підвищенню якості електроенергії, економічності її виробництва, надійності роботи систем та живлення приймачів електроенергії. При цьому зростання рівня автоматизації суднових систем, впровадження сучасних систем управління та навігації, супроводжується зростанням потужності суднових енергетичних систем (СЕС) [1].

Розвиток СЕС відбувається як в традиційному напрямі – шляхом вдосконалення їх робочих процесів, так і в напрямку утилізації вторинних енергоресурсів [2]. Зокрема, очевидною є доцільність підвищення ефективності саме головного двигуна як універсального джерела механічної і електричної енергії за рахунок утилізації його вторинних енергоресурсів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час для підвищення ефективності суднових енергетичних установок (СЕУ) широко застосовуються системи відбору тепла відпрацьованих газів. Наприклад, на багатьох судах використовується схема вироблення електроенергії і тепла з застосуванням теплоутилізаційного обладнання у складі суднової електростанції. При цьому теплоутилізаційне обладнання включає в себе котли-утилізатори, що відбирають теплоту від відпрацьованих газів дизель-генератора (ДГ), та утилізаційні водо-водяні теплообмінники, що відбирають теплоту з контуру охолодження ДГ [3-6]. Проте, при безлічі позитивних властивостей така схема має деякі серйозні недоліки.

Іншим принципом утилізації тепла відпрацьованих газів є використання турбокомпресорних систем, у яких енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, що передає енергію на привод гребного гвинта або на привод електрогенератора.

Головною перевагою технологій відбору енергії тепла відпрацьованих газів є:

- збільшення ефективності використання палива завдяки більш високому ККД;
- зниження шкідливих викидів в атмосферу;
- можливість використання утилізаційного обладнання як резервного джерела електроенергії [7];
- для турбокомпресорних систем – можливість ефективного забезпечення режимів роботи двигуна завдяки гнучкому керуванню тиском наддування.

У судновій комплексній електроенергетичній турбокомпресорній установці (СКЕЕТКУ) компоненти, а саме головний двигун, турбіна, компресор і генератор, можуть бути з'єднані між собою як одним валом, так і за допомогою системи редукторів.

Аналіз сучасних систем утилізації тепла вихлопних газів показує, що їх режими й умови роботи вибираються без урахування особливостей роботи та режимів СЕУ. Так, режими роботи турбогенераторів, як правило, вибираються без урахування особливостей і режимів роботи газотурбінного наддування суднових дизелів. У зв'язку з цим, практично у всіх випадках виникають

проблеми із забезпеченням наддування при пуску двигунів, їх роботі на режимах малого ходу, а також на режимах при надлишковій потужності турбіни. Відзначені проблеми можуть бути вирішені відносно просто – за рахунок відповідної зміни режиму роботи генератора з перетворювачем частоти. У режимі пуску двигуна й на малому ходу наддування може здійснюватися переведенням генератора в режим двигуна при його живленні від суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) [2]. Тому в якості генератора в СКЕЕТКУ, що розглядається, використано асинхронну машину (рис. 1).

Асинхронна машина характеризується своєю простотою та надійністю, можливістю роботи як в генераторному, так і в двигуновому режимах. Проте для керування такою асинхронною машиною необхідне застосування систем з напівпровідниковими перетворювачами різного призначення в тому числі й систем з перетворювачами змінного струму змінної частоти в змінний струм постійної частоти. Через те, що асинхронна машина в системі повинна мати можливість працювати як в генераторному, так і в двигуновому режимах, перетворювач частоти мусить забезпечувати двонаправлену передачу енергії. З даної точки зору доцільним є застосування матричних та гібридних структур силових перетворювачів.

Асинхронна машина в залежності від режиму роботи, який задається перетворювачем частоти, може або відбирати надлишкову потужність з турбіни, або передавати додаткову енергію на компресор при недостатньому тиску у вхідному трубопроводі. При надлишку електричної енергії є можливість використання компресора для обертання головного двигуна (за рахунок подачі стисненого повітря в головний двигун), а також при пуску головного двигуна (при цьому генератор використовується як двигун) компресор може використовуватися як додаткове джерело енергії (рис. 2) [9].

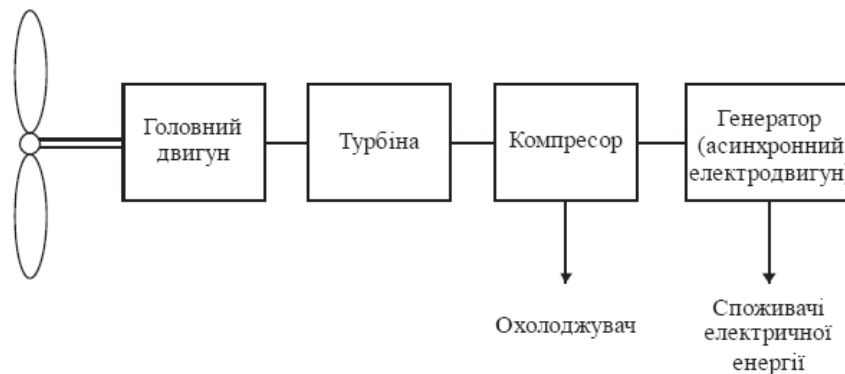


Рис. 1. Загальна схема побудови суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки

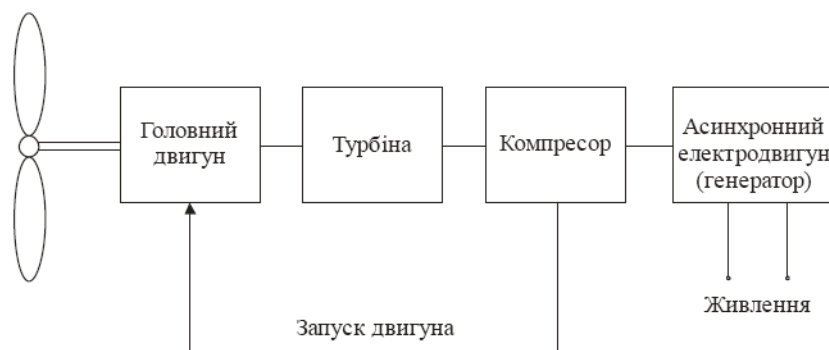


Рис. 2. Схема використання компресора як додаткового джерела енергії

СКЕЕТКУ призначена здійснювати генерування електричної енергії за рахунок утилізації тепла відпрацьованих газів головного двигуна. Вона також може використатися при нестачі потужності як додаткове джерело енергії. Однак, для ефективної роботи такого складного комплексу необхідно своєчасне перемикання між режимами генерування та постачання електричної енергії, що можливо при існуванні належної системи керування. При розробці методів керування та виборі технічних засобів насамперед постає задача аналізу СКЕЕТКУ як об'єкта керування.

#### Мета дослідження

Метою досліджень є побудова математичної моделі СКЕЕТКУ як об'єкта керування, яка дозволить здійснювати аналіз процесів, що протікають в системі, та оцінювати ефективність методів керування, що розроблюються.

#### Викладення основного матеріалу дослідження



Для побудови математичної моделі СКЕЕТКУ як об'єкту керування розглянемо взаємозв'язки між окремими складовими компонентами комплексу. Схему взаємодії компонентів наведено на рис.3.

До складу комплексу входять окремі підсистеми:

- головна (дизельна) енергетична установка (ГЕУ) з турбонаддувом;
- система автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧО) валу головного двигуна;
- система відбору потужності (СВП).

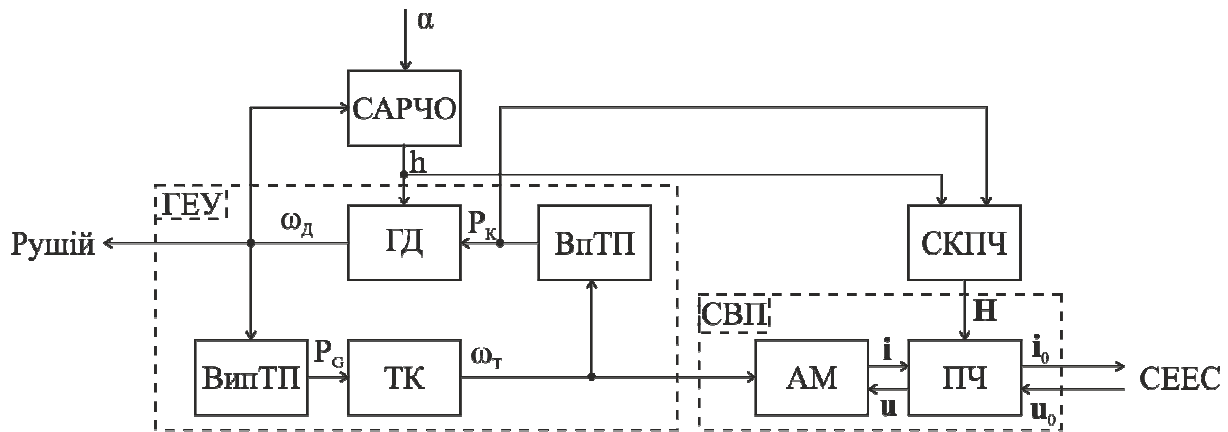


**Рис. 3. Схема взаємозв'язки між складовими компонентами СКЕЕТКУ**

Розглянемо диференційні рівняння, що описують динамічні процеси найбільш значущих елементів комплексу.

1. Головна енергетична установка.

В її склад входять: головний двигун (ГД), турбокомпресор (ТК), впускний та випускний трубопроводи (ВпТП та ВипТП). Запишемо диференційні рівняння для окремих компонентів ГЕУ (див. рис. 3) [10]:

1). Для поршневої частини головного двигуна.

$$T_D \frac{d\varphi_D}{dt} + \varphi_D = k_1 \mu + k_2 \rho, \quad (1)$$

де  $T_D$  - постійна часу головного двигуна,  $\varphi_D = \Delta\omega_D / \omega_{D0}$  - відносна зміна частоти обертання колінчастого валу дизеля від бажаної  $\omega_{D0}$ ;  $\mu = \Delta h / h_0$  - відносна зміна дозуючої рейки паливних насосів;  $\rho = \Delta P_K / P_{K0}$  - відносна зміна тиску надувного повітря;  $k_1, k_2$  - відповідні коефіцієнти посилення.

2). Для турбокомпрессора

$$T_T \frac{d\varphi_T}{dt} + \varphi_T = k_3 \zeta + k_4 \mu + k_5 \rho, \quad (2)$$

де  $T_T$  - постійна часу турбокомпресора,  $\varphi_T = \Delta\omega_T / \omega_{T0}$  - відносна зміна частоти обертання ротора турбіни;  $\zeta = \Delta P_G / P_{G0}$  - відносна зміна тиску відпрацьованих газів;  $k_3$ ,  $k_4$  та  $k_5$  - відповідні коефіцієнти посилення.

3). Для выпускного трубопроводу

$$T_V \frac{d\rho}{dt} + \rho = k_6 \phi_T - k_7 \phi_D, \quad (3)$$

де  $T_V$  - постійна часу випускного трубопроводу;  $k_6, k_7$  - відповідні коефіцієнти посилення.

4). Для впускного трубопровода

$$T_G \frac{d\zeta}{dt} + \zeta = k_8 \phi_D + k_9 \rho - k_{10} \mu, \quad (4)$$

де  $T_G$  - постійна часу випускного трубопроводу;  $k_8$ ,  $k_9$  та  $k_{10}$  - відповідні коефіцієнти посилення.

## 2. Система автоматичного регулювання частоти обертання валу головного двигуна.

САРЧО призначена для стабілізації (підтримання) частоти обертання валу головного двигуна на певному (заданому) значенні. На сучасних судах застосовують електронні регулятори, які включають в себе датчик частоти обертання (ДЧО), електронний блок керування (ЕБК) та виконавчий механізм (ВМ), що впливає на дозуючу рейку паливного насоса високого тиску (рис. 4).

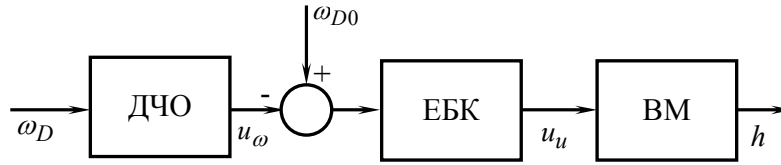


Рис. 4. Структурна схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу

1). Датчик частоти обертання при дослідженнях доцільно розглядати як ідеальну підсилюючу ланку, якій відповідає вираз

$$u_\varphi = k_\varphi \varphi_D, \quad (1)$$

де  $u_\varphi = \Delta u_\omega / \omega_{D0}$  - зміна результатів вимірювань відносно бажаної частоти обертання;  $k_\varphi$  - коефіцієнт посилення датчика.

2). Електронний блок керування здійснює регулювання за ПД-законом, якому відповідає рівняння

$$u_u = K_P u_\varphi + K_I \int u_\varphi dt + K_D \frac{du_\varphi}{dt}, \quad (5)$$

де  $u_u$  - сигнал керування, що формується регулятором;  $K_P$ ,  $K_I$  та  $K_D$  - коефіцієнти налаштування регулятора.

3). Виконавчий механізм, що діє на паливну рейку, зазвичай при моделюванні задають як інерційну ланку першого порядку, якій відповідає рівняння

$$T_M \frac{d\mu}{dt} + \mu = k_M u_u, \quad (6)$$

де  $T_M$  - постійна часу виконавчого механізму;  $k_M$  - коефіцієнт посилення.

## 3. Система відбору потужності.

В СВП (див. рис. 3) як генератор використано асинхронну машину (АМ) з масивним ротором, яка (за потребою) може бути перемкнута у режим двигуна завдяки застосуванню належного перетворювача частоти (ПЧ) зі власною системою керування (СКПЧ). ПЧ також здійснює узгодження параметрів електричного сигналу, що генерується, з судновою електромережею.

1). Асинхронна машина. Для аналізу квазістаціонарних режимів асинхронної машини, можна використовувати класичне подання у нерухомій системі координат ( $\omega_k = 0$ ). При цьому процеси в машині описуються наступною системою рівнянь, що зручно наводити у векторно-матричній формі [11]:

$$\begin{bmatrix} p i_{as} \\ p i_{\beta s} \\ p i_{ar} \\ p i_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s \omega_1} & \omega \frac{k}{\sigma} & \frac{k_s}{T_r \omega_1} & \omega \frac{k_s}{\sigma} \\ -\omega \frac{k_s}{\sigma} & -\frac{1}{T_s \omega_1} & -\omega \frac{k_s}{\sigma} & \frac{k_s}{T_r \omega_1} \\ \frac{k_r}{T_s \omega_1} & -\omega \frac{k_r}{\sigma} & -\frac{1}{T_r \omega_1} & -\frac{\omega}{\sigma} \\ \omega \frac{k_s}{\sigma} & \frac{k_r}{T_s \omega_1} & \frac{\omega}{\sigma} & -\frac{1}{T_r \omega_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{\beta s} \\ i_{ar} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T} \\ -\frac{k_r}{T} & 0 \\ 0 & -\frac{k_r}{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{as} \\ U_{\beta s} \end{bmatrix}, \quad (7)$$



де  $U_s, i_s, i_r$  – вектори статорної і роторної перемінної;  $L_s$  – індуктивність статора;  $L_r$  – індуктивність ротора;  $L_m$  – взаємна індукція;  $\omega$  – швидкість ротора;  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$  – результируючий коефіцієнт розсіювання;  $k = L_m^2 / (L_r L_s)$  – результируючий коефіцієнт зв'язку;  $k_s = L_m / L_s$ ;  $k_r = L_m / L_r$ ; – результируючий коефіцієнт зв'язку статора і ротора;  $U_\delta = U_n$  – номінальна фазна напруга;  $I_\delta = I_n$  – струм;  $t_\delta = 1/\omega$ ,  $\omega$  – кутова частота на виході ПЧ;  $M_\delta$  – номінальний момент;  $T = \sigma L_s I_n / U_n \approx \sigma L_s S_n / R_r$  – еквівалентна постійна часу двигуна;  $T_s = \sigma L_s / R_s$ ,  $T_r = \sigma L_r / R_r$  – еквівалентна постійна часу ланцюга статора і ротора.

Якщо проєкції струмів розглядати як змінні стану, то (7) можна записати як рівняння стану

$$p\mathbf{i} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (8)$$

де  $\mathbf{i}$  – вектор стану (струму),  $\mathbf{u}$  – вектор входу (напруги),  $\mathbf{A}$  та  $\mathbf{B}$  – матриці стану та входу відповідно.

Таким чином, поведінка асинхронної машини, величина та напрямок передачі енергії цілком визначається формою фазної напруги.

2). Перетворювач частоти. У регульованих асинхронних приводах живлення здійснюється від перетворювача, напругу на виході якого зручно представляти за допомогою перемикаючих функцій [11]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{H} \times \mathbf{u}_0, \quad (9)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор фазних напруг  $[m \times 1]$  ( $m$  – кількість фаз на виході перетворювача),  $\mathbf{u}_0$  – вектор вхідних напруг  $[n \times 1]$  ( $n$  – кількість фаз живлення перетворювача);  $\mathbf{H}$  – матриця перемикаючих функцій  $[m \times n]$ .

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11}'' & h_{12}'' & \dots & h_{1n}'' \\ h_{21}'' & h_{22}'' & \dots & h_{2n}'' \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1}'' & h_{m2}'' & \dots & h_{mn}'' \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В перетворювачах частоти з ланкою постійного струму вектор вхідних напруг перетворюється в два етапи: спочатку з системи вхідних фаз за допомогою випрямляча перетворюється на скаляр, а потім, завдяки інвертору, формується система вихідних фаз. Матричні перетворювачі виконують перетворення в один етап, отримуючи фазні напруги одразу з вхідних, через що мають високий коефіцієнт корисної дії. Крім того, через відсутність реактивних елементів у проміжних колах, матричні перетворювачі дозволяють забезпечувати високий коефіцієнт потужності. Вектор вхідних струмів перетворювача у цьому випадку визначається як

$$\mathbf{i}_0 = \mathbf{H}^T \times \mathbf{i}, \quad (11)$$

де  $\mathbf{i}$  – вектор фазних струмів  $[m \times 1]$ ,  $\mathbf{i}_0$  – вектор вхідних струмів  $[n \times 1]$

Застосування перетворювача частоти змінного струму значно спрощує вирішення питань утилізації тепла відпрацьованих газів та відповідно підвищення ефективності ГЕУ.

Аналізуючи складові моделі можна виявити вхідні, вихідні та внутрішні параметри СКЕЕТКУ як об'єкта керування.

Вхідними факторами, що діють на об'єкт, є

- сигнал завдання частоти обертання валу головного двигуна, який задається людиною-оператором та відповідає потрібній швидкості руху судна;
- момент опору гвинта, який суттєво залежить від частоти обертання валу (швидкості руху судна) та зовнішніх факторів, а саме: морського хвилювання, глибини, ступені обростання корпусу та ін.

До вихідних факторів можна віднести наступні:

- частоту обертання валу головного двигуна;
- потужність, що відбирається та передається в судову електричну мережу або додається з судової електромережі.

До сигналів керування можна віднести наступні змінні:

- величину переміщення паливної рійки;
- частоту обертання турбіни;
- логічне керування ключами перетворювача частоти.

### Висновки

Математична модель СКЕЕТКУ, яка будується з розглянутих моделей компонентів, надає можливість аналізувати процеси, що протікають в системі, та оцінювати ефективність методів керування, що розроблюються.

Для визначення адекватності математичної моделі, яка створюється за запропонованим підходом, доцільно здійснити імітаційне моделювання роботи СКЕЕТКУ для реальної судової установки в різних режимах роботи.

Для визначення властивостей СКЕЕТКУ як об'єкта керування, таких як стійкість, керованість, спостережливість, необхідно отримати математичну модель комплексу у просторі станів.

### Список використаної літератури

1. Пахомов Ю.А. Суднові енергетичні установки із двигунами внутрішнього згоряння. – М: Транслит, 2007. 528 с.
2. Вороненко С.В., Даник В.В. Система утилізації тепла вихлопних газів з асинхронним турбогенератором. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Херсон, 2014. № 10. С.164-169.
3. Селиверстов В.И. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. – Л.: Судостроение, 1973. 218 с.
4. Кривов В.Г., Синатов С.А. Повышение эффективности дизельных энергоустановок путем утилизации отходящей теплоты. Двигателестроение. 1979. № 10. С. 14–18.
5. Кривов В.Г., Синатов С.А., Гулин С.Д. и др. Комплексное электроснабжение на базе дизельных электростанций с внешней утилизацией отходящей теплоты. Двигателестроение. 1988. № 9. – С. 3–7.
6. Technology Characterization: Reciprocating Engines Prepared for: Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership Division. Washington, DC, Prepared by: Energy Nexus Group 1401 Wilson Blvd, Suite 1101 Arlington, Virginia 22209, February 2002.
7. Седаков, Л. П., Баракан Г.Х., Калинина Л.И. Резервы повышения экономичности современных судовых дизельных энергетических установок. Судостроение. 1987. № 11. С. 20-25.
8. Барков, В. М. Когенераторные технологии: возможности и перспективы. «ЭСКО». Электронный журнал энерго-сервисной компании «Экологические системы». №7. 2004.
9. Рябенкий М.В., Короленко О.В., Вороненко С.В., Короленко С.О. Головний двигун та суднова генераторна система в когенераційній установці судна. Електротехнічні та комп'ютерні мережі. Одеса ,2017. №26(102). С. 9-16.
10. Беляев И.Г., Седых В.И. Слесаренко В.Н. Автоматизация процессов в судовой энергетике. / Под ред. В.Н. Слесаренко. М.: Транспорт, 2000. 395с.
11. Лебеденко Ю.О. Високоякісний асинхронний привод з безпосереднім перетворювачем частоти та мікропроцесорним управлінням Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. Херсон: ХДТУ, 2001, № 2. С. 108-112.

### References

1. Pakhomov Yu.A. Sudnovi enerhetychni ustanovky iz dvyhunamy vnutrishnoho zghoriannia. – M: Translyt, 2007. 528 s.
2. Voronenko S.V., Danik V.V. Sistema utilisatsiyi tepla vikhlopnih gaziv z asinhronnim turbogeneratorom. Naukoviy visnik Hersonskoyi derzhavnoyi morskoyi akademiyi. Herson, 2014. # 10. S.164-169.
3. Seliverstov V.I. Utilizatsiya tepla v sudovyih dizelnyih ustanovkah. – L.: Sudostroenie, 1973. 218 s.
4. Krivov V.G., Sinatov S.A. Povyishenie effektivnosti dizelnyih energoustanovok putem utilisatsii othodyashey teploty. Dvigatelistroenie. 1979. # 10. S. 14–18.
5. Krivov V.G., Sinatov S.A., Gulin S.D. i dr. Kompleksnoe elektrosnabzhenie na baze dizelnyih elektrostantsiy s vneshney utilisatsiey othodyashey teploty. Dvigatelistroenie. 1988. # 9. – S. 3–7.
6. Technology Characterization: Reciprocating Engines Prepared for: Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership Division. Washington, DC, Prepared by: Energy Nexus Group 1401 Wilson Blvd, Suite 1101 Arlington, Virginia 22209, February 2002.
7. Sedakov, L. P., Barakan G.H., Kalinina L.I. Rezervy povysheniya ekonomichnosti sovremennyih sudovyih dizelnyih energeticheskikh ustanovok. Sudostroenie. 1987. # 11. S. 20-25.
8. Barkov, V. M. Kogeneratornyie tehnologii: vozmozhnosti i perspektivy. «ESKO». Elektronnyiy zhurnal energo-servisnoy kompanii «Ekologicheskie sistemyi». #7. 2004.
9. Riabenkiy M.V., Korolenko O.V., Voronenko S.V., Korolenko Ye.O. Holovnyi dvyhun ta sudnova heneratorna systema v koheneratsiinii ustanovtsi sudna. Elektrotekhnichni ta kompiuterni merezhi. Odesa ,2017. №26(102). S. 9-16.

10. Belyaev I.G., Sedyih V.I. Slesarenko V.N. Avtomatizatsiya protsessov v sudovoy energetike. / Pod red. V.N. Slesarenko. M.: Transport, 2000. 395s.
11. Lebedenko Yu.O. Vysokoiakisnyi asynkhronnyi pryvod z bezposerednim peretvoriuvachem chastoty ta mikroprotseornym upravlinniam Avtomatyka. Avtomatyzatsiia. Elektrotekhnichni komplekсы ta systemy. Kherson: KhDTU, 2001, № 2. S. 108-112.

УДК 004.942

І.М. ГВОЗДЕВА, М.А. ЯКИМЕНКО, В.В. ДЕМИРОВ

Национальный университет "Одесская морская академия"

В.Ф. МИРГОРОД

Военная академия (г. Одесса)

Е.В. ДЕРЕНГ

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины

## ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

*Предлагается и обосновывается подход к оценке элементов пространства диагностических признаков технического состояния судовых дизель-генераторных агрегатов. Собраны и систематизированы статистические данные, характеризующие техническое состояние судовых дизель-генераторных агрегатов в реальных условиях эксплуатации. На основе полученных данных проведено ранжирование диагностических параметров состояния судовых дизель-генераторных агрегатов. Разработана нелинейная регрессионная модель температурного режима судового дизель-генераторного агрегата и осуществлена ее компьютерная реализация. Полученные результаты позволяют уменьшить уровень ошибок первого рода ("ложных тревог") и, тем самым, повысить достоверность диагностических выводов автоматизированных систем контроля и диагностики.*

*Ключевые слова:* диагностический параметр, дизель-генераторный агрегат, статистические данные, регрессионная модель.

І.М. ГВОЗДЕВА, М.А. ЯКИМЕНКО, В.В. ДЕМИРОВ

Національний університет "Одеська морська академія"

В.Ф. МИРГОРОД

Військова академія (м. Одеса)

Є.В. ДЕРЕНГ

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

## ОЦІНКА ЕЛЕМЕНТІВ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТІВ

*Пропонується і обґрунтовується підхід до оцінки елементів простору діагностичних ознак технічного стану судових дизель-генераторних агрегатів. Зібрано та систематизовано статистичні дані, що характеризують технічний стан судових дизель-генераторних агрегатів в реальних умовах експлуатації. На основі отриманих даних проведено ранжування діагностичних параметрів стану судових дизель-генераторних агрегатів. Розроблено нелінійна регресійна модель температурного режиму судового дизель-генераторного агрегату і здійснена її комп'ютерна реалізація. Отримані результати дозволяють зменшити рівень помилок першого роду ("хибних тривог") і, тим самим, підвищити достовірність діагностичних висновків автоматизованих систем контролю і діагностики.*

*Ключові слова:* діагностичний параметр, дизель-генераторний агрегат, статистичні дані, регресійна модель.

I.M. HVOZDEVA, M.A. YAKYMENKO, V.V. DEMIROV

National University "Odessa Maritime Academy"

V.F. MYRHOROD

Military Academy (Odessa city)

Y.V. DERENH

Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of National Academy of Science of Ukraine

## ESTIMATION OF SPACE ELEMENTS OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF TECHNICAL CONDITION OF THE SHIP DIESEL GENERATOR SETS

*The task of diagnosing of the technical conditions of vessel diesel-generator sets is considered. We offered and substantiated the approach to estimation of elements space of diagnostic signs.*

*Statistical data, characterizing the technical conditions of vessel diesel-generator sets, are collected and systematized. These data about the parameters changing of diagnosed object were obtained during the long operation period. Meteorological conditions and different modes of vessel operations are taken into account. The statistical analysis of the obtained data allowed us to distinguish the interrelated set of diagnostic parameters, the most informing for the estimation of the technical conditions of vessel diesel-generator sets. The power, load*

current, engine speed and the temperature of the cylinders exhaust gases are selected as main parameters, characterizing the diesel-generator set operation.

The coefficients of correlation of all registered parameters are calculated. The correlation coefficients of current and temperatures of exhaust gases of engine cylinders have the highest values, close to 0,9. Based on the confirmed statistical relationship of diagnostic parameters, the nonlinear regression model is proposed and substantiated. The offered model describes the dependence of average temperature of the exhaust gases of engine cylinders on the load current of a diesel generator set. The determination coefficients for the regressions of various orders are calculated.

The proposed nonlinear regression model of change of cylinders average temperature from change of load current of diesel-generator set makes it possible to improve the algorithms of diagnosing of its technical condition, to increase the reliability of diagnostic conclusions and to reduce the probability of the first kind errors. We recommend to carry out a further trend analysis for deviations of parameters from the proposed regression model. Such approach allows to decrease the residual variance.

Research of the diagnostic signs space of technical conditions of vessel diesel-generator sets and comparative analysis of their informing allowed to distinguish the most significant diagnostic parameters and to establish the relationship between them.

Keywords: diagnostic parameter, diesel-generator set, statistical data, regression model.

### Постановка проблемы.

При постоянно растущих требованиях к технико-экономическим и эксплуатационным характеристикам судовых электроэнергетических станций (СЭЭС) и, в том числе к характеристикам дизель-генераторных агрегатов (ДГА), приоритетной становится стратегия обслуживания указанных объектов по техническому состоянию. Такая стратегия позволит повысить надежность и эффективность эксплуатации СЭЭС и продлить межремонтный период работы оборудования, входящего в ее состав. Ключевым вопросом указанной стратегии является создание интегрированных систем управления с полной ответственностью, в состав которых входят автоматизированные системы контроля и диагностики (АСКД).

Важная научно-прикладная проблема состоит в повышении надежности статистических выводов АСКД о техническом состоянии судовых ДГА в реальных условиях эксплуатации. Техническое состояние судовых дизель-генераторных агрегатов определяется по данным дискретных измерений термогазодинамических и электрических параметров: температур, давлений, оборотов турбин, вибропараметров, токов нагрузки и т.д. Проблема состоит в том, что алгоритмы контроля значений параметров состояния судовых ДГА, которые в настоящее время применяются в АСКД, сопровождаются достаточно высоким уровнем ошибок первого рода ("ложных тревог"), что приводит к безосновательному выведению объектов из технологического процесса или снятию их с эксплуатации [1]. Причина возникновения ошибок заключается в том, что при контроле указанных параметров АСКД фиксирует только факт их выхода за установленные пределы, без учета возникающей в процессе долгосрочной эксплуатации тенденции к изменению номинальных значений параметров (тренда параметров). Применение в АСКД более совершенных алгоритмов оценки технического состояния ДГА, учитывающих информативность параметров контроля их технического состояния и наличие естественного тренда, позволит повысить достоверность диагностических выводов.

Важным этапом решения указанной проблемы является оценка элементов пространства диагностических признаков технического состояния судовых ДГА по данным, полученным в реальных условиях эксплуатации, с помощью методов математического моделирования и современных информационных технологий.

### Анализ последних исследований и публикаций

Работы [1–4] посвящены проблемам технического диагностирования судовых ДГА. При оценке их технического состояния возникает ряд трудностей, одна из которых связана с многообразием параметров, на основе которых производится оценка технического состояния [5, 6]. В [1, 7, 8] предложено расширение признакового пространства принятия решений и повышение достоверности диагностических выводов АСКД на основе использования многомерного анализа временных рядов. Работа [3] посвящена применению алгоритмов нечеткой логики при обработке диагностической информации о техническом состоянии судовых дизельных двигателей. В [7] обоснован выбор информационных параметров для судовых АСКД, на основе которых проводится оценка технического состояния ДГА.

В [1, 9] проанализированы структурные схемы АСКД, применяемых на современных судах, и используемые в них алгоритмы контроля параметров. В [10–13] рассмотрены методы и средства технической диагностики, принципы выбора параметров и алгоритмов поиска неисправностей в сложных технических системах. Возможности использования в АСКД алгоритмов нечеткой логики с целью повышения их эффективности раскрыты в работах [3, 10]. Анализ последних исследований и публикаций [8] позволяет сделать вывод о существующем противоречии между возможностями новых алгоритмов работы судовых АСКД с использованием современных программных средств и информационных технологий и их фактической программно-алгоритмической реализацией.

### Цель исследования

Целью данной работы является оценка элементов признакового пространства диагностических параметров технического состояния судового дизель-генераторного агрегата на основе построения нелинейной регрессионной модели.

### Изложение основного материала исследования

Жесткие требования, предъявляемые к надежности функционирования судовых СЭЭС и их элементов (в том числе ДГА), обуславливают необходимость непрерывного автоматического контроля параметров, определяющих их техническое состояние, с целью своевременного выявления возникающих дефектов. На основе такого контроля может быть реализован переход к стратегии обслуживания СЭЭС и их элементов по техническому состоянию, что позволит обеспечить уменьшение времени простоя оборудования и повышение безотказности работы всех элементов. Достоверность диагностирования технического состояния ДГА с помощью АСКД играет в этой стратегии ключевую роль.

В работе предлагается подход к исследованию признакового пространства параметров, определяющих техническое состояние судовых ДГА. В рамках предлагаемого подхода собраны и систематизированы статистические данные, характеризующие техническое состояние судовых ДГА в реальных условиях эксплуатации. На основе полученных данных проведено ранжирование диагностических параметров состояния судовых ДГА, разработана нелинейная регрессионная модель температурного режима судового дизель-генераторного агрегата и осуществлена ее компьютерная реализация с использованием современных программных средств.

Сбор статистических данных о техническом состоянии судовых ДГА балкера NORDSCHELDE водоизмещением 50000 т. проводился в период с 16.10.2017 г. по 27.03.2018 г. в различных режимах работы судна (ходовом, маневренном, стояночном с грузовыми операциями и стояночном без грузовых операций).

Исследуемая СЭЭС состояла из трех ДГА, в составе которых использованы дизельные двигатели модели 6EY18L производителя YANMAR и генераторы производителя HYUNDAI. Параметры ДГА контролировались двумя системами мониторинга: EPM (Enamor Power Monitor) и Kongsberg K-Chief 600 [9]. Система EPM контролирует и анализирует электроэнергетические параметры, вырабатываемые синхронными генераторами (напряжение, силу тока, частоту, мощность, коэффициент мощности и т.д.). Передача полученных данных осуществляется по стандарту RS 485 в формате NMEA («National Marine Electronics Association») другим судовым системам мониторинга, в том числе основной системе мониторинга Kongsberg K-Chief 600. Эта система контролирует диагностические параметры, по которым определяется техническое состояние судовых ДГА. К таким параметрам относятся: температура выходящих газов цилиндров, температура газов на входе в турбонагнетатель, температура контура охлаждения пресной водой на входе и выходе и другие.

Для фиксации значений диагностических параметров судовых ДГА была создана специальная электронная таблица, в которую каждые 24 часа заносились текущие значения. Систематизация полученных данных позволила сформировать общий массив, состоящий из 30 векторов параметров, каждый длиной по 162 значения. На основе статистического анализа полученных данных выделена взаимосвязанная совокупность диагностических параметров, наиболее информативных для оценки технического состояния судовых ДГА [6]. К таким параметрам относятся температуры выходящих газов каждого цилиндра исследуемых дизелей и ток нагрузки (мощность при постоянном напряжении) (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная таблица информативности диагностических параметров технического состояния ДГА

| Выходные параметры ДГ                 | Значение критерия информативности |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Виброакустический                     | 2,145–2,526                       |
| Частота вращения дизеля               | 2,030–2,436                       |
| Среднее индикаторное давление         | 1,227–1,48                        |
| Удельный расход топлива               | 1,227–1,48                        |
| Температура выходящих газов           | 1,227–1,48                        |
| Суммарный коэффициент избытка воздуха | 0,852–0,962                       |
| Давление продувочного воздуха         | 0,061–0,557                       |
| Температура продувочного воздуха      | 0,061–0,557                       |
| Температура коленчатого вала          | 0,012–0,31                        |
| Температура головного подшипника      | 0,003–0,008                       |

Исследуемые выходные параметры ДГА по значениям критерия информативности  $K_u$  условно могут быть разделены на 3 группы [6]: высокоинформативные ( $K_u = (1,0 - 0,3)K_u^{\max}$ ); средней информативности ( $K_u = (0,3 - 0,03)K_u^{\max}$ ); низкой информативности ( $K_u < 0,03K_u^{\max}$ ).



На основе анализа полученных данных в качестве основного параметра, характеризующего работу ДГА в зависимости от нагрузки, выбрана температура выходящих газов цилиндров дизельного двигателя (рис. 1). Хотя информативность частоты вращения ДГА выше, однако, в системе мониторинга этот параметр не фиксировался, а при его косвенной оценке на основе значений частоты тока возможны погрешности.

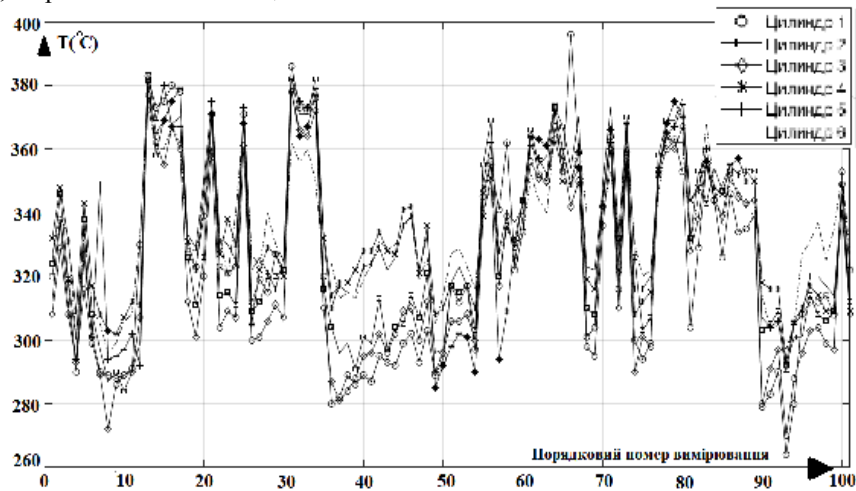


Рис. 1. Временные ряды температур выходящих газов по цилиндрам №1- №6

На рисунке 1 представлены графики значений температур выходящих газов каждого цилиндра ДГА №1, на основе анализа которых можно оценить распределение нагрузки по цилиндрам. Для определения равномерности распределения нагрузки по цилиндрам ДГА № 1 анализировалось изменение силы тока в разных режимах работы судовой электростанции (рис. 2).

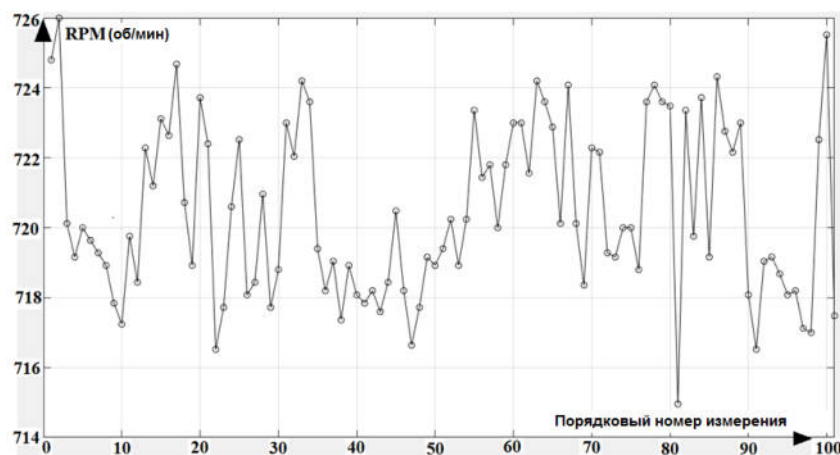


Рис. 2. Временной ряд силы тока (характеризует нагрузку на ДГА № 1)

Полученные в результате расчетов коэффициенты корреляции тока и температур выходящих газов цилиндров №1-№6 представлены на рис. 3.

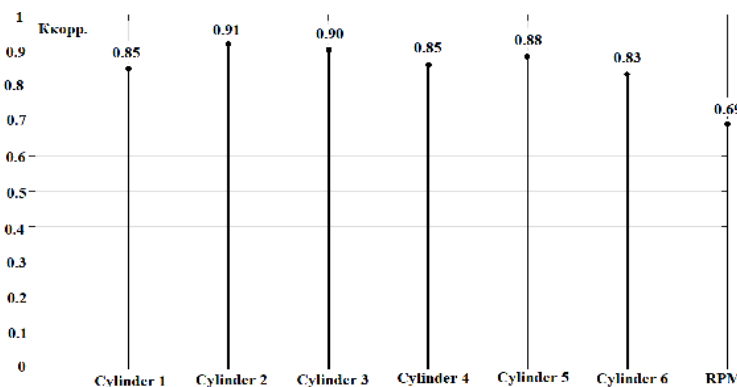


Рис. 3. Коэффициенты корреляции тока и температур выходящих газов цилиндров №1-№6 и коэффициент корреляции тока со скоростью вращения вала ДГА № 1

Как видно из рис. 3, значения коэффициентов корреляции для каждого из цилиндров превышают 0,84 и являются значимыми, что свидетельствует о стабильной работе всех цилиндров рассматриваемого ДГА. Следует отметить, что кроме перечисленных диагностических параметров, необходимо учитывать расход топлива, изменение оборотов и давления в цилиндрах, однако при этом возрастает размерность признакового пространства, что делает проблематичным оценку технического состояния ДГА в реальном масштабе времени.

В системе мониторинга Kongsberg K-Chief 600 при контроле технического состояния ДГА используется полигон допустимых отклонений температуры выходящих газов цилиндров дизельного двигателя от номинальной. В процессе эксплуатации ДГА при различной нагрузке указанные температуры каждого из цилиндров не должны выходить за пределы заданной области, ограниченной прямыми линиями [9]. Указанная модель не учитывает взаимосвязь диагностических параметров ДГА, а также естественный тренд, возникающий в процессе их длительной эксплуатации.

Подтвержденная статистическая взаимосвязь диагностических параметров ДГА позволила предложить и обосновать нелинейную регрессионную модель изменения средней температуры выходящих газов цилиндров от изменения тока нагрузки. Температура выходящих газов является косвенным показателем теплонапряженности и распределения нагрузки между цилиндрами дизельного двигателя [14]. Понижение температуры выходящих газов цилиндров может свидетельствовать о произвольном выключении цилиндров, что может быть связано с зависанием плунжера топливного насоса высокого давления. Слишком высокая или неравномерная температура выходящих газов может свидетельствовать о нарушении процессов сгорания. Например, высокая температура выходящих газов в одном из цилиндров может быть вызвана перегрузкой цилиндра (большой подачей топлива), плохим распылением топлива или его поздней подачей, низкой компрессией в цилиндре и т.д.

Повышение средней температуры выходящих газов всех цилиндров может свидетельствовать о таких неисправностях, как: перегрузка ДГА, вызванная ухудшением внешних условий или чрезмерной подачей топлива; низкое давление продувочного воздуха; повышение температуры после турбонаддува; воспламенение маслянистых отложений в подпоршневой емкости или продувочном ресивере.

Построение регрессионных моделей диагностических параметров судовых ДГА выполнено в программной среде MATLAB\_16 с помощью инструмента графического окна MATLAB Basic Fitting. Полученные уравнения регрессии представлены на графике зависимости среднего значения температуры выходящих газов цилиндров дизельного двигателя ДГА № 1 от тока нагрузки (рис. 4).

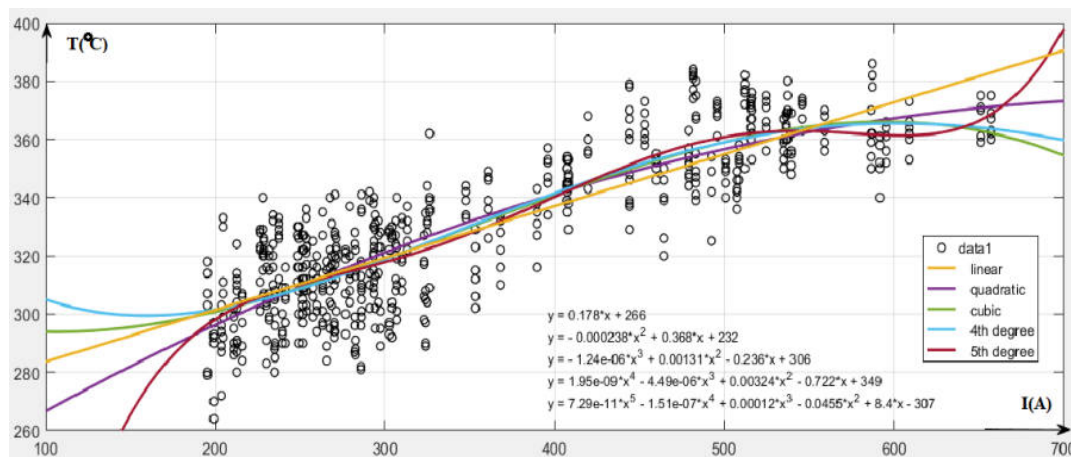


Рис. 4. Регрессионные модели 1-го - 5-го порядков для среднего значения температуры выходящих газов цилиндров дизельного двигателя

Модели 3-го – 5-го порядков имеют меньшее значение нормы остатков, однако модельные кривые не совпадают с реальными данными в областях низких и высоких значений нагрузки. Выбор модели, которая наиболее адекватно отображает реальные физические процессы в ДГА, происходил между регрессионными моделями 1-го и 2-го порядков, однако, значение нормы остатков для модели 2-го порядка меньше чем для модели 1-го порядка.

Более точно определить, насколько хорошо полиномиальная регрессия прогнозирует данные наблюдений, можно путем вычисления коэффициента детерминации. Коэффициент детерминации, значение которого колеблется от 0 до 1, измеряет полезность независимой переменной в прогнозировании значений зависимой переменной, и рассчитывается следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - y_{\text{model}})^2}{(n-1) \cdot \sigma^2}, \quad (1)$$

где  $y$  – эмпирические значения зависимой переменной;  $y_{\text{model}}$  – значение модели зависимой переменной;  $n$  – количество измерений;  $\sigma^2$  – значение дисперсии. Значение коэффициента детерминации  $R^2$  для регрессий 1-го и 2-го порядков равно 0,71 и 0,73 соответственно. Такой результат говорит о том, что полиномиальные регрессионные модели первого и второго порядка адекватно отражают изменение температурного режима в зависимости от нагрузки ДГА. На основе рассчитанного полинома второго порядка и на базе полученных экспериментальных данных построена соответствующая модель (рис. 5), а на рис. 6. показан график отклонений от полученной модели.

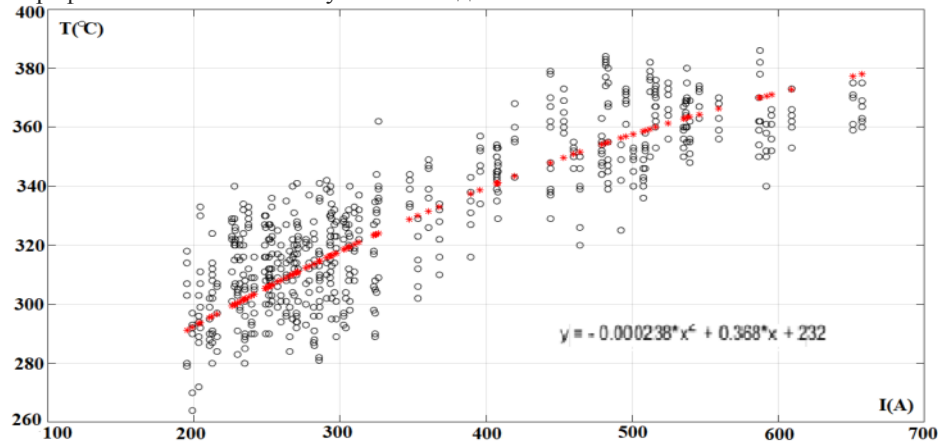


Рис. 5. Модель зависимости среднего значения температуры от нагрузки

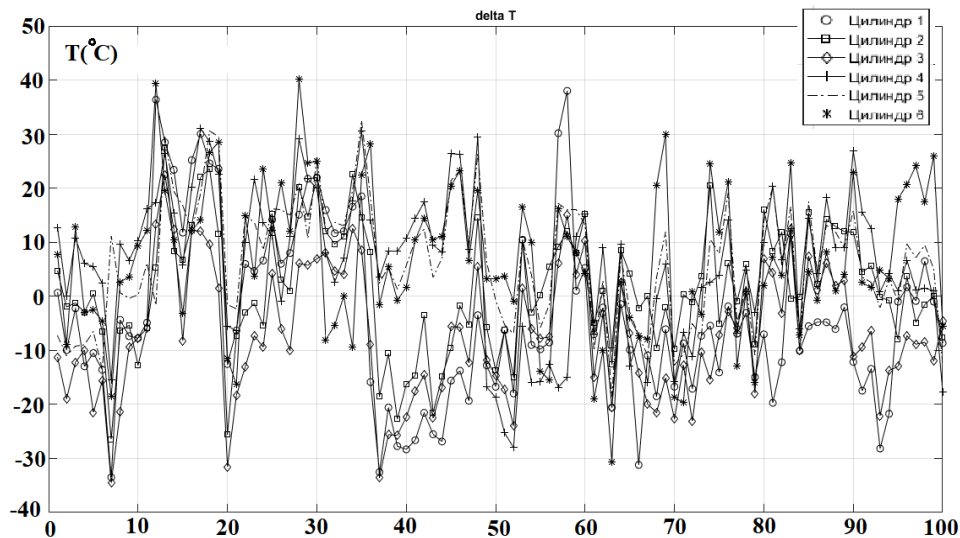


Рис. 6. График отклонений эмпирических значений температуры выходящих газов всех цилиндров ДГА № 1 от модельных значений

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эмпирическая нелинейная регрессионная модель зависимости средней температуры выходящих газов цилиндров ДГА от его нагрузки позволяет построить признаковое пространство из отклонений значений температур для каждого из цилиндров от эмпирической модели. Сравнение данных, представленных на рис. 1 и рис. 2 подтверждает многократное снижение дисперсии отклонений признаков и повышение устойчивости к выбросам, что позволяет уменьшить уровень ошибок первого рода (“ложных тревог”) и, тем самым, повысить достоверность диагностических выводов АСКД.

### Выводы

Исследование пространства диагностических признаков технического состояния судовых ДГА и сравнительный анализ их информативности позволил выделить наиболее значимые диагностические параметры и установить взаимосвязи между ними. Предложенная нелинейная регрессионная модель изменения средней температуры выходящих газов цилиндров ДГА от изменения тока нагрузки дает возможность усовершенствовать алгоритмы диагностирования технического состояния ДГА, повысить достоверность диагностических выводов АСКД и снизить вероятность “ложных тревог”.

## Список использованной литературы

1. Гвоздева И. М., Демиров В. В. Трендовый контроль в современных системах диагностики судовых энергетических установок. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2016. № 3. С. 191–194.
2. Головкин С. В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия управление, вычислительная техника и информатика*. Астрахань, 2009. № 2. С. 90–95.
3. Надеев А. И., Буй Х. Н., Васильевич С. Ф. Диагностика технического состояния судовых дизелей на основе интеллектуального анализа данных. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. Астрахань, 2011. № 2.
4. Миська А. Р. Трендовый контроль режимных параметров дизель-генераторных установок. *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков, 2010. № 7. С. 154–157.
5. Кононова Е. А., Нечаус А. А., Серпутько А. П. Выбор обобщенного диагностического параметра для оценки технического состояния дизель-генератора. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2010. № 3(25). С. 156–163.
6. Грицай Л. Л., Горбунов В. Ф., Калугин В. Н. Информационная ценность диагностических параметров судовых малооборотных дизелей. *Судостроитель*, 1973. № 8. С. 35–37.
7. Борисенко А. Н., Кубрик Б. И., Лавриненко О. В. и др. Обоснование и выбор информационных сигналов для систем управления и технической диагностики дизель генераторов. *Вестник Национального технического университета "ХПИ". Автоматика и приборостроение*. Харьков, 2011. № 57. С. 3–8.
8. Hvozdeva I., Myrhorod V., Derenh Y. The Metod of Trend Analysis of Parameters Time Series Gas-turbine Engine State : 9th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences State. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York, 2017, № 1895. P. 030002-1-030002-9.
9. AutoChief C20: Instruction Manual Sulzer RT-Flex Engines Fixed Propeller installation, 2016. 127 p.
10. Говорущенко Н. Я. Диагностика технического состояния автомобилей : учебник. Москва : Транспорт, 1970. 256 с.
11. Надев А. И., Буй Х. Н., Свирипов Ф. В. Моделирование судового дизеля как объекта управления на базе нечеткой логики. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. Астрахань, 2012. №1.
12. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей : монография. / С. В. Епифанов и др. Киев : Техника, 1998. 312 с.
13. Миргород В. Ф., Ранченко Г. С. Особенности применения трендовых статистик при обработке данных в системах технической диагностики. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2005. № 4. С. 25–27.
14. Грицай Л. Л. Справочник судового механика : в 2 т. / Москва : Транспорт, 1974. Т. 2 / общ. ред. Л. Л. Грицай. С. 697–1376.

## References

1. Gvozdeva I. M., Demirov V. V. Trendovyy kontrol v sovremennyih sistemah diagnostiki sudovyih energeticheskikh ustanovok. *Visnik Hersonskogo natsionalnogo tehnlchnogo unIversitetu*. Herson, 2016. № 3. S. 191–194.
2. Golovko S. V. Diagnostika tehničeskogo sostoyaniya sudovogo elektrooborudovaniya na osnove intellektualnogo analiza dannyih. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya upravlenie, vyichislitel'naya tehnika i informatika*. Astrahan, 2009. № 2. S 90–95.
3. Nadeev A. I., Buy H. N., Vasilevich S. F. Diagnostika tehničeskogo sostoyaniya sudovyih dizeley na osnove intellektualnogo analiza dannyih. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Morskaya tehnika i tehnologiya*. Astrahan, 2011. № 2.
4. Miska A. R. Trendovyy kontrol rezhimnyih parametrov dizel-generatornyih ustanovok. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. Harkov, 2010. № 7. S. 154–157.
5. Kononova E. A. Vyibor obobschennogo diagnosticheskogo parametra dlya otsenki tehničeskogo sostoyaniya dizel-generatora. *ZbIrnik naukovih prats HarkIvskogo natsIonalnogo unIversitetu PovItryanih Sil*. HarkIv, 2010. № 3(25). S. 156–163.
6. Gritsay L. L. Informatsionnaya tsennost diagnosticheskikh parametrov sudovyih malooborotnyih dizeley. *Sudostroitel*, 1973. № 8. S. 35–37.

7. Borisenko A. N. Obosnovanie i vyibor informatsionnyih signalov dlya sistem upravleniya i tehnikeskoy diagnostiki dizel generatorov. *Vestnik Natsionalnogo tehnikeskogo universiteta "HPI". Avtomatika i priborostroenie*. Harkov, 2011. № 57. S. 3–8.
8. Hvozdeva I., Myrhorod V., Derenh Y. The Metod of Trend Analysis of Parameters Time Series Gas-turbine Engine State : 9th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences State. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York, 2017, № 1895. P. 030002-1-030002-9.
9. AutoChief C20: Instruction Manual Sulzer RT-Flex Engines Fixed Propeller installation, 2016. 127 p.
10. Govoruschenko N. Ya. Diagnostika tehnikeskogo sostoyaniya avtomobiley : uchebnik. Moskva : Transport, 1970. 256 s.
11. Nadev A. I., Buy H. N., Svirepov F. V. Modelirovanie sudovogo dizelya kak ob'ekta upravleniya na baze nechetskoy logiki. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya*. Astrahan, 2012. №1.
12. Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinnih dvigateley : monografiya. / S. V. Epifanov i dr. Kiev : Tehnika, 1998. 312 s.
13. Mirgorod V. F., Ranchenko G. S. Osobennosti primeneniya trendovyih statistik pri obrabotke dannyih v sistemah tehnikeskoy diagnostiki. *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2005. № 4. S. 25–27.
14. Gritsay L. L. Spravochnik sudovogo mehanika : v 2 t. / Moskva : Transport, 1974. T. 2 / obsch. red. L. L. Gritsay. S. 697–1376.



УДК 519.6

В.І.ГНІТЬКО

Інститут проблем машинобудування ім.А.М.Подгорного НАН України

Л.В.РОЗОВА, А.Ю.ГАРМАШ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

### АНАЛІЗ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ З ПЕРЕГОРОДКАМИ ЗА РІЗНІ УМОВИ ЗАКРІПЛЕННЯ

Запропоновано новий варіант методу скінченних елементів для аналізу міцності та коливань оболонок обертання з довільним розгалуженим меридіаном. Рівняння руху оболонки за відсутності зовнішніх збурень отримано на основі принципу Остроградського – Гамільтона. Використовується теорія тонких оболонок Кірхгофа – Лява. Вектор переміщень в циліндричній системі зображено у вигляді ряду Фур'є за окружною координатою. Рівняння коливань отримано для кожної гармоніки окремо. Геометричні характеристики елемента описується за допомогою кубічних поліномів. Функції форми складають повну систему незалежних поліномів третього ступеня і є одновимірними функціями Ерміта. На основі запропонованого методу надано аналіз частот і форм коливань циліндричної оболонки з перегородкою за різні умови закріплення.

Ключові слова: метод скінченних елементів, частоти і форми коливань, вільні коливання, складені оболонки обертання.

В.И.ГНИТЬКО

Институт проблем машиностроения им.А.Н.Подгорного НАН Украины

Л.В.РОЗОВА, А.Ю.ГАРМАШ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

### АНАЛИЗ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С ПЕРЕГОРОДКАМИ ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Предложен новый вариант метода конечных элементов для анализа прочности и колебаний оболочек вращения с произвольным разветвленным меридианом. Уравнения движения оболочки при отсутствии внешних воздействий получено на основе принципа Остроградского – Гамильтона. Используется теория тонких оболочек Кирхгофа-Лява. Вектор перемещений в цилиндрической системе представлен в виде ряда Фурье по окружной координате. Уравнение колебаний получено для каждой гармонической составляющей отдельно. Геометрические характеристики элемента описываются с помощью кубических полиномов. Функции формы составляют полную систему независимых полиномов третьей степени и являются одномерными функциями Эрмита. На основе предложенного метода приведен анализ частот и форм колебаний цилиндрической оболочки с перегородкой при разных условиях закрепления.

Ключевые слова: метод конечных элементов, частоты и формы колебаний, свободные колебания, составные оболочки вращения.

V.I. GNITKO

A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems

L.V. ROZOVA, A.Y. GARMASH

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

### FREE VIBRATION ANALYSIS OF SHELLS OF REVOLUTION WITH BAFFLES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF FIXATION

Knowledge of the smallest free oscillation frequencies of structure elements is a topical problem due possibility to set off unwanted resonant oscillation frequencies in the presence of excitation forces. In this paper a new version of the finite element method for analysis of strength and vibrations of shells of revolution characterized by an arbitrary branched meridian is proposed. The Kirchhoff – Love theory of thin shells is used for studying the shell static and dynamic characteristics. The equation of the shell motion in absence of external perturbations is based on the Ostrogradsky-Hamilton principle. The discrete analog of this equation is obtained with finite element method technique. The displacement vector in the cylindrical coordinate system is depicted as the Fourier series by the circumferential coordinate. The equation of oscillation is obtained for each harmonic separately. The geometric characteristics of elements are described using cubic polynomials. The shape functions constitute the complete system of independent polynomials of the third degree, and each of them is one-dimensional Hermite function. Formulas for mass and stiffness matrixes are received. The integration along the shell meridian is accomplished by summation of integrals along one-dimensional finite elements. The only



*meridian is divided into finite elements. It is the main advantage of developed technique. The standard Gauss quadrature formulas are involved. The original computer codes are elaborated for implementation the proposed finite-element based approach. On the basis of the developed method the analysis of modes and frequencies of vibrations of the cylindrical shell with horizontal baffles for different conditions of fastening is provided. The fastening conditions that provide the lowest frequencies are revealed. The influence of baffles on the modes and frequencies of the shells under consideration is estimated. The obtained modes of vibrations may be used as the basis functions for research in the area of forced and parametric vibration of both empty and fluid-filled shells of revolution.*

*Key words: method of the finite elements, frequencies and forms of the oscillations, free vibrations, composed shells of the revolution.*

### Постановка проблеми

У машинобудуванні широко використовуються конструкції, елементами яких є оболонки обертання з різними формами меридіана. Це корпуси енергетичних установок, насосів, компенсатори зсувних та осювих переміщень, колони випарних апаратів, нафтохранилища і таке інше. Такі оболонки зазвичай є частково заповненими рідиною, працюють в умовах інтенсивних силових впливів. Для оцінки міцності та ресурсу конструкцій, складених з оболонок обертання, важливо визначити спектр частот їх коливань. Визначення найменших частот коливань дає можливість відстроювання від небажаних резонансних частот коливань при наявності сил збудження. Існують потужні сучасні комплекси динамічного та міцносного розрахунків. Але при моніторингу стану обладнання літаків, космічних апаратів, танкерів потрібна оперативна інформація щодо напружено-деформованого стану та спектральних характеристик. Таку інформацію можна отримати із застосуванням сучасних спеціалізованих обчислювальних комплексів, що орієнтовані на розрахунки конкретних елементів конструкцій. В цій роботі запропоновано методику розрахунку динамічних характеристик оболонок обертання, що мають розгалужений меридіан з урахуванням можливості встановлення різних перегородок. Ці оболонки можуть бути заповнені рідиною, мати різні умови закріплення. Методика заснована на використанні одновимірної методи скінчених елементів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх публікацій та доповідей на конференціях свідчить, що тематика досліджень в області дослідження міцності та коливань оболонок та оболонкових конструкцій з використанням числового аналізу досить велика. Це легко зрозуміти, якщо врахувати надзвичайне різноманіття сфер застосування оболонок та умов їх експлуатації. Огляди наукових праць за останні роки виявили необхідність проведення досліджень власних частот та форм коливань оболонок обертання. Аналіз робіт, присвячених розрахунку оболонок, у тому числі тих, що моделюють посудини і резервуари з небезпечними заповнювачами, дозволяє виділити в даний час як основні і найбільш ефективні методи чисельного інтегрування, метод скінчених різниць і методи скінчених і граничних елементів. С.Г. Годунов запропонував метод ортогоналізації [1], який дозволяє отримати чисельний розв'язок крайових задач для лінійних диференціальних рівнянь, коли водночас наявні швидко зростаючі та швидко спадаючі розв'язки. На основі цього методу, який може бути легко реалізований на сучасній ЕОМ, розроблені ефективні алгоритми розрахунку оболонок. До задач статичної несиметричної навантажених ізотропних оболонок обертання метод вперше був застосований Я.М. Григоренко, А.Т. Василенко [2], а в пізніших працях [3 – 5] – до задач статичної та динамічної складених оболонок обертання з розгалуженим меридіаном. Узагальнення даного методу розрахунку на задачі стійкості і коливань вісесиметричних багатозв'язаних ізотропних і ортотропних тонкостінних оболонкових конструкцій було зроблене В.І. М'яченковим і І.В. Григор'євим [6]. На теперішній час з використанням методу скінчених елементів розв'язано задачі щодо вимушених коливань оболонок обертання за дії імпульсних та сейсмічних впливів [7 – 8], вільних коливань слоїстих оболонок [9,10] та оболонок з дефектами [11]. Новий ефективний варіант методу граничних елементів запропоновано в [12].

### Мета дослідження

Аналіз власних частот та форм коливань оболонок обертання з довільним меридіаном.

### Викладення основного матеріалу дослідження

#### 1. Матриці жорсткості та мас в методі скінчених елементів

Розглянемо задачу про вільні коливання пружної оболонки обертання, частково заповненою ідеальною нестискуваною рідиною.

Систему рівнянь руху символічно запишемо у виді:

$$L(U) + M(\ddot{U}) = P, \quad (1)$$

де  $L$ ,  $M$  – оператори пружних і масових сил;  $P$  – тиск рідини на змочену поверхню оболонки;

$U=(u_1, u_2, u_3)$  – вектор-функція переміщень.

Вивчимо малі гармонійні коливання пружної оболонки. Представимо вектор  $U$  у формі  $U=ue^{i\Omega t}$ , де  $\Omega$  – частота, а  $u$  – власна форма коливань даної оболонки з рідиною.

Будемо шукати власні форми коливань в рідині у вигляді:

$$u = \sum_{k=1}^N c_k u_k \quad (2)$$

де  $u_k$  – власні форми коливань оболонки у вакуумі,  $c_k$  – невідомі коефіцієнти.

Іншими словами, форму коливань оболонки з рідиною визначимо, як лінійну комбінацію власних форм її коливань у вакуумі.

Відмітимо, що виконуються наступні співвідношення:

$$L(u_k) = \Omega_k^2 M(u_k), \quad (M(u_k), u_j) = \delta_{kj}. \quad (3)$$

Отже,

$$(L(u_k), u_j) = \Omega_k^2 \delta_{kj}. \quad (4)$$

де  $\Omega_k$  –  $k$ -а частота власних коливань у вакуумі.

Ці співвідношення показують, що власні форми коливань оболонки у вакуумі мають бути ортонормовані за матрицею мас.

Рівняння руху оболонки за відсутності зовнішніх збурень може бути описане на основі принципу Остроградського - Гамільтона:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta\Pi - \delta T) dt = 0, \quad (5)$$

де  $\Pi, T$  – потенційна і кінетична енергія відповідно.

Для дискретизації рівняння (5) скористаємося методом скінченних елементів. Нехай  $U=(U_r, U_z, U_\theta)$  – вектор переміщень оболонки в циліндричній системі координат  $r, z, \theta$ . Представимо вектор переміщень у вигляді розкладання в ряд Фур'є по окружній координаті

$$U(r, z, \theta) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} u_\alpha(r, z) C_\alpha(\theta) \quad (6)$$

де

$$C_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha \theta & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha \theta \end{bmatrix}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, \infty$$

Потенційна енергія деформації може бути представлена в наступній формі:

$$\Pi = \frac{1}{2} \iint_S \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dS_1 dS_2, \quad (7)$$

де  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – компоненти тензорів напружки і деформацій;

$$dS_1 = A_1 d\alpha_1, \quad dS_2 = A_2 d\alpha_2 = r d\theta \quad (8)$$

$dS_i$  – диференціали дуг серединної поверхні, проведених в напрямках координатних ліній  $\alpha_1, \alpha_2$ .

Для кінетичної енергії маємо вираз

$$T = \frac{1}{2} \iint_S \rho \dot{u}_i \dot{u}_i dS_1 dS_2. \quad (9)$$

Зв'язок між компонентами деформацій і переміщеннями оболонки зобразимо в матричному виді:

$$\varepsilon_\alpha = D_\alpha u_\alpha, \quad (10)$$

де  $D_\alpha$  – диференціальний оператор, отриманий на основі геометричних співвідношень Коши для тонких оболонок [13].

Залежності між компонентами напружень і деформацій виражаються за допомогою узагальненого закону Гуку

$$\sigma_\alpha = E \varepsilon_\alpha. \quad (11)$$

Підстановка співвідношень (2), (10), (11) в рівняння (1) дозволяє записати рівняння коливань оболонки для довільного члена ряду  $\alpha$  у вигляді:

$$\int_{S_1}^{S_2} \int_0^{2\pi} \delta u_{\alpha}^T G_{\alpha} u_{\alpha} A_1 d\alpha_1 r d\theta = \int_{S_1}^{S_2} \int_0^{2\pi} \delta u_{\alpha}^T \rho \ddot{u}_{\alpha} A_1 d\alpha_1 r d\theta, \quad (12)$$

де  $G_{\alpha}$  – результат добутку матриць.

$$G_{\alpha} = C_{\alpha}^T D_{\alpha}^T E D_{\alpha} C_{\alpha}.$$

У подальших викладках опустимо для спрощення запису індекс  $\alpha$ .

Розіб'ємо меридіан оболонки на ряд криволінійних скінченних елементів. Геометрія елементу описується кубічними поліномами та їх похідними вздовж  $S_1$  і виражається через координати граничних вузлів з індексами  $i, j$  у вигляді:

$$z = z_i \psi_1^i + z_i' \psi_2^i + z_j \psi_1^j + z_j' \psi_2^j, \quad r = r_i \psi_1^i + r_i' \psi_2^i + r_j \psi_1^j + r_j' \psi_2^j.$$

Функції  $\psi$  складають повну систему незалежних поліномів третього ступеня і є одновимірними функціями Ерміта:

$$\psi_1^i = 1 - 3t^2 + 2t^3, \quad \psi_2^i = t - 2t^2 + t^3, \quad \psi_1^j = 3t^2 - 2t^3, \quad \psi_2^j = -t^2 + t^3. \quad (13)$$

Параметр  $t$  набуває значень  $0 \leq t \leq 1$  і є безрозмірною довжиною, що відповідає кожному елементу. Функції (13) задовольняють умовам

$$\begin{bmatrix} \psi_1^i & \psi_2^i \\ \psi_1^{i'} & \psi_2^{i'} \end{bmatrix} = E|_{t=0}, \quad 0|_{t=1}, \quad \begin{bmatrix} \psi_1^j & \psi_2^j \\ \psi_1^{j'} & \psi_2^{j'} \end{bmatrix} = E|_{t=1}, \quad 0|_{t=0};$$

в силу цих властивостей співвідношення (13) в точках  $i, j$  є тотожністю.

Для подання функцій переміщень використовуються ті ж функції форми, що і для опису геометрії елементу:

$$u = \psi^i u_i + \psi^j u_j, \quad (14)$$

де  $\psi^i = \begin{bmatrix} \psi_1^i & \psi_2^i \end{bmatrix}$  – матриця функцій форми;  $u_i$  – вектор вузлових параметрів (детальний опис надано в роботі [14,15]).

Відповідно до концепції методу скінченних елементів (МСЕ) інтегрування по поверхні оболонки в (12) зводиться до підсумовування інтегралів по поверхнях скінченних елементів. Підставивши апроксимації (13) в (12), отримаємо вирази коефіцієнтів матриць жорсткості і мас елементу:

$$g_e^{ij} = f_{\alpha} \int_0^1 \psi_e^i{}^T G_e \psi_e^j A_{1e} r_e dt, \quad m_e^{ij} = f_{\alpha} \int_0^1 \psi_e^i{}^T \rho \psi_e^j A_{1e} r_e dt, \quad (15)$$

де  $f_{\alpha} = 2\pi$  при  $\alpha=0$  і  $f_{\alpha} = \pi$  при  $\alpha > 0$ .

Інтеграли в (15) обчислюються чисельно по 6-ти вузловим формулам Гауса.

Після формування глобальних матриць жорсткості  $K$  і мас  $M$  системи шляхом підсумовування матриць елементів рівняння коливань оболонки набирає вигляду

$$Ku + M\ddot{u} = 0 \quad (16)$$

Рішенням цього рівняння є функція

$$u = v \cos \omega t \quad (17)$$

при виконанні умови

$$(K - \omega^2 M)v = 0 \quad (18)$$

що є характеристичним рівнянням для визначення частот вільних коливань.

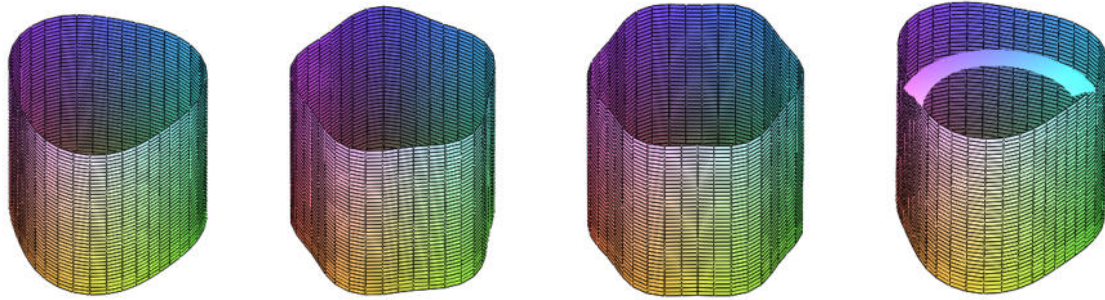
## 2. Числовий аналіз і обговорення результатів.

Під час розрахунків проведених за запропонованою методикою з використанням розробленого скінченно-елементного програмного комплексу, були отримані власні частоти та форми коливань циліндричних оболонок. Метою розрахунків було виявити при яких граничних умовах частоти власних коливань найнижчі.

Спочатку розглядалися циліндричні оболонки без перегородки з двома варіантами закріплення.

В першому вважалось, що оболонка закріплена шарнірно з одного краю, другий край вільний. Для другого розрахунку оболонка була жорстко защемлена з одного краю.

Для обох видів закріплення: перша найнижча частота - відповідає 3-й гармоніці, друга найнижча частота отримана на 5-й гармоніці, третя найнижча частота - отримана на 6-й гармоніці при розрахунках. Форми власних коливань, що відповідають найнижчим частотам наведено на рис.1.а,б,в. Числові значення власних перших трьох частот наведено у таблиці 1.

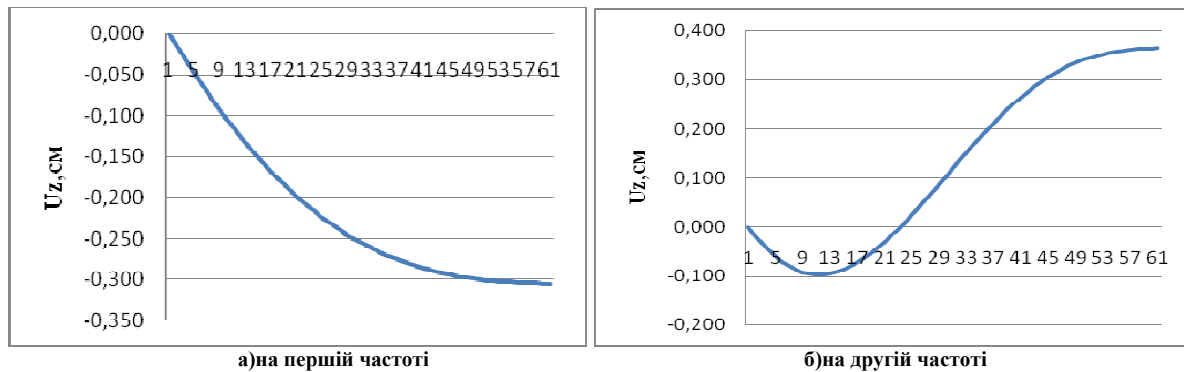


а) третя гармоніка б) п'ята гармоніка в) шоста гармоніка г) третя гармоніка  
Рис. 1. Форми власних коливань для оболонки без перегородки: а) на першій частоті ; б) на другій частоті; в) на третій частоті. Форма власних коливань оболонки з перегородкою: г) на другій частоті.

Таблиця 1

Найнижче значення власних частот оболонки без перегородки для перших трьох частот, Гц.

| Вид закріплення    | Перша частота   | Друга частота   | Третя частота   |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                    | Третя гармоніка | П'ята гармоніка | Шоста гармоніка |
| шарнір             | 152,06          | 385,07          | 658,78          |
| жорстке защемлення | 153,27          | 390,95          | 673,49          |



а) на першій частоті б) на другій частоті  
Рис.2. Переміщення  $U_z$  вздовж твірної оболонки, шарнірно закріпленої з одного краю.

Розрахунки довели, що найнижчі власні частоти притаманні циліндричній оболонці, що закріплена шарнірно по одному краю.

Також проведено розрахунок циліндричної оболонки з перегородкою. Аналіз впливу перегородок на частоти та форми коливань циліндричної оболонки показав, що найнижча перша власна частота коливань відповідає нульовій гармоніці, є меншою у порівнянні найнижчою частотою коливань оболонки без перегородки. Внаслідок цього вимушені коливання будуть відбуватися з меншою частотою. Отримані результати дають змогу відстроюватись від небажаних резонансних частот. На рис.1г зображена форма коливань оболонки з перегородкою на третій гармоніці, для третьої частоти. Числові значення власних перших трьох частот наведено у таблиці 2.

Таблиця 1

Найнижче значення власної частоти для перших трьох частот для оболонки з перегородкою, Гц.

| Вид закріплення    | Перша частота     | Друга частота   | Третя частота   |
|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                    | Нульова гармоніка | Перша гармоніка | третя гармоніка |
| шарнір             | 91,93             | 256,67          | 343,97          |
| жорстке защемлення | 101,07            | 256,67          | 345,07          |

### Висновки

Запропоновано ефективний підхід до аналізу напружено-деформованого стану та частот і форм коливань оболонок обертання з довільним розгалуженим меридіаном. Метод заснований на використанні одновимірних скінченних елементів, тобто дискретизації піддається лише меридіан оболонки. Це суттєво зменшує обчислювальні витрати. Тому запропонований метод може використовуватись як для оперативної оцінки міцносних та динамічних характеристик оболонкової конструкції, так і в складі обчислювальних комплексів для аналізу міцності конструкцій під впливом різних факторів. В результаті

проведеного числового аналізу було встановлено, що найнижчі частоти вільних коливань досягаються для циліндричної оболонки, що закріплена шарнірно по одному краю. Якщо відома частота коливань сили збудження, то можна провести відстроювання від небезпечного режиму коливань за рахунок зміни умов закріплення або шляхом встановлення горизонтальної перегородки. У подальшому передбачається розвинути запропонований метод щодо аналізу вимушених та параметричних коливань.

#### Список використаної літератури

1. Годунов С.К. О численном решении краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. *Успехи мат. наук.* 1961. Вип.3. С.171–174.
2. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. О расчете и выборе рациональных параметров оболочечных конструкций из композиционных материалов. *Механика композит. материалов.* 1981. № 1. С.64–69.
3. Gnitko V., Degtyarev K., Naumenko V., Strelnikova E. Coupled BEM and FEM Analysis of fluid-structure interaction in dual compartment tanks. *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements.* 2018. Vol. 6(6). P. 976-988.
4. Zarutskii V.A., Lugovoi P.Z., Meish V.F. Dynamic problems for and stress-strain state of inhomogeneous shell structures under stationary and nonstationary loads. *International Applied Mechanics.* 2009. Vol. 45. No 3. P. 245-271.
5. Gnitko V., Degtyarev K., Naumenko V., Strelnikova E. Reduced Boundary Element Method for Liquid Sloshing Analysis of Cylindrical and Conical Tanks with Baffles. *Int. Journal of Electronic Engineering and Computer Sciences.* 2016. Vol. 1. № 1. P.14-27.
6. Мяченков В.И., Григорьев В.И. Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ: справочник. Москва: Машиностроение, 1981. 216 с.
7. Strelnikova E., Yeseleva E., Gnitko V., Naumenko V. Free and forced vibrations of the shells of revolution interacting with the liquid. *Proc. of XXXII Conference Boundary elements and other mesh reduction methods, WITPress, Transaction on Modeling and Simulation.* 2010. Vol.50. P. 203-211.
8. Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *Proc. of XXXIII Conference Boundary elements and other mesh reduction methods, WITPress, Transaction on Modeling and Simulation.* 2011. Vol. 52. P. 285-296.
9. Caliri M. F., Ferreira A. J. M., Tita V. A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method. *Composite Structures.* 2016. Vol. 156. P. 63–77.
10. Carrera E., Pagani A. Valvano S. Shell elements with through-the-thickness variable kinematics for the analysis of laminated composite and sandwich structure. *Composites. Part B: Engineering.* 2017. Vol. 111. P. 294–31.
11. Gavrilenko G.D., Matsner V. I., Kutenkova O.A. Free vibrations of ribbed cylindrical shells with local axisymmetric deflections. *International Applied Mechanics.* 2008. Vol.44. Issue 9. P.1006–1014.
12. Kim J.G., Lee J.K., Yoon H.J. Free vibration analysis for shells of revolution based on p-version mixed finite element formulation. *Finite Elements in Analysis and Design.* 2015. Vol.95. P.12-19.
13. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз. 1962. 432 с.
14. Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements.* 2016. Vol.67. P.13-25.
15. Еселева Е.В., Гнидько В.И., Стрельникова Е.А. Собственные колебания сосудов высокого давления при взаимодействии с жидкостью. *Проблемы машиностроения.* Харків, 2006. №1. С.105-118.

#### References

1. Godunov S.K. O chislennom reshenii kraevyih zadach dlya sistem obyiknovennyih differentsialnyih uravneniy. *Uspehi mat. nauk.* 1961. Vip.3. S.171–174.
2. Grigorenko Ya.M., Vasilenko A.T. O raschete i vyibore ratsionalnyih parametrov obolochechnyih konstruksiy iz kompozitsionnyih materialov. *Mehanika kompozit. materialov* 1981. № 1. S.64–69.
3. Gnitko V., Degtyarev K., Naumenko V., Strelnikova E. Coupled BEM and FEM Analysis of fluid-structure interaction in dual compartment tanks. *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements.* 2018. Vol. 6(6). P. 976-988.
4. Zarutskiy V.A., Lugovoi P.Z., Meish V.F. Dynamic problems for and stress-strain state of inhomogeneous shell structures under stationary and nonstationary loads. *International Applied Mechanics.* 2009. Vol. 45. No 3. P. 245-271.



5. Gnitko V., Degtyarev K., Naumenko V., Strelnikova E. Reduced Boundary Element Method for Liquid Sloshing Analysis of Cylindrical and Conical Tanks with Baffles. *Int. Journal of Electronic Engineering and Computer Sciences*. 2016. Vol. 1. № 1. P.14-27.
6. Myachenkov V.I., Grigorev V.I. Raschet sostavnyih obolocheknyih konstruksiy na EVM: spravochnik. Moskva: Mashinostroenie, 1981. 216 s.
7. Strelnikova E., Yeseleva E., Gnitko V., Naumenko V. Free and forced vibrations of the shells of revolution interacting with the liquid. *Proc. of XXXII Conference Boundary elements and other mesh reduction methods, WITPress, Transaction on Modeling and Simulation*. 2010. Vol.50. P. 203-211.
8. Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *Proc. of XXXIII Conference Boundary elements and other mesh reduction methods, WITPress, Transaction on Modeling and Simulation*. 2011. Vol. 52. P. 285-296.
9. Caliri M.F., Ferreira A.J.M., Tita V. A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method. *Composite Structures*. 2016. Vol. 156. P. 63–77.
10. Carrera E., Pagani A. Valvano S. Shell elements with through-the-thickness variable kinematics for the analysis of laminated composite and sandwich structure. *Composites. Part B: Engineering*. 2017. Vol.111. P. 294–31.
11. Gavrilenko G.D., Matsner V.I., Kutenkova O.A. Free vibrations of ribbed cylindrical shells with local axisymmetric deflections. *International Applied Mechanics*. 2008. Vol.44. Issue 9. P.1006–1014.
12. Kim J.G., Lee J.K., Yoon H.J. Free vibration analysis for shells of revolution based on p-version mixed finite element formulation. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol.95. P.12-19.
13. Novozhilov V.V. Teoriya tonkih obolochek. L.: Sudpromgiz. 1962. 432 s.
14. Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnik U. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol.67. P.13-25.
15. Eseleva E.V., Gnitko V.I., Strelnikova E.A. Sobstvennyie kolebaniya sosudov vyisokogo davleniya pri vzaimodeystvii s zhidkostyu. Problemy mashinostroeniya. Harkiv, 2006. #1. S.105-118.



УДК 621.311.25:621.039:661.654

О.В. ДОБАРИНА, К.В. БЕГЛОВ  
Одеський національний політехнічний університет**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА  
АЕС ПРИ ЗМІНЕННІ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ**

Українські енергоблоки АЕС працюють на енергосистемі з великою кількістю споживачів електроенергії. Споживання електроенергії досить стрибкоподібно, це пов'язано з різними потребами її використання, яке залежить від сезону, дня тижня, а також часу доби. Енергоблоки з ВВЕР - 1000 проектувалися для роботи, тільки в базовому режимі, тому питання маневрування енергоблоками, на сьогоднішній день, є гострим, а рішення такого завдання неоднозначно. Вибір програми регулювання залежить від багатьох факторів, але завжди зміна програми регулювання проводиться після зупинки енергоблоку. Однак, були проведені дослідження, які показали, що можливі ситуації, коли виникає необхідність перейти з однієї програми регулювання на іншу і це можна зробити без зупинки енергоблоку. Тому виникла необхідність синтезу та аналізу автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС, що дозволяє підтримувати характерний технологічний параметр, який вибирається в залежності від застосовуваної програми регулювання без зупинки енергоблоку.

Ключові слова: АЕС, енергоблок, програма регулювання, потужність, маневрений режим.

О.В. ДОБАРИНА, К.В. БЕГЛОВ  
Одесский Национальный Политехнический Университет, Украина**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Украинские энергоблоки АЭС работают на энергосистеме с большим количеством потребителей электроэнергии. Потребление электроэнергии довольно скачкообразно, это связано с различными потребностями её использования, которое зависит от сезона, дня недели, а также времени суток. Энергоблоки с ВВЕР – 1000 проектировались для работы, только в базовом режиме, поэтому вопрос маневрирования энергоблоками, на сегодняшний день, является острым, а решение такой задачи неоднозначно. Выбор программы регулирования зависит от многих факторов, но всегда изменение программы регулирования производится после останова энергоблока. Однако, были проведены исследования, которые показали, что возможны ситуации, когда возникает необходимость перейти с одной программы регулирования на другую и это можно сделать без остановки энергоблока. Поэтому возникла необходимость синтеза и анализа автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС, позволяющей поддерживать характерный технологический параметр, который выбирается в зависимости от применяемой программы регулирования без остановки энергоблока.

Ключевые слова: АЭС, энергоблок, программа регулирования, мощность, маневренный режим

O.V. DOBARINA, K.V. BEGLOV  
Odessa National Polytechnic University, UKRAINE**RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE NUCLEAR POWER  
PLANT LOADING WHEN CONTROL PROGRAM IS BEEN CHANGING**

Ukrainian nuclear power units operate on a power system with a large number of electricity consumers. Electricity consumption is quite abrupt, this is due to the different needs of its use, which depends on the season, day of the week, as well as the time of day. Power units with WWER-1000 were designed for operation only in the basic mode, so the issue of maneuvering power units, today, is acute, and the solution of such a problem is ambiguous. The choice of a control program depends on many factors, but always a change in the control program is made after the power unit is stopped. However, studies have been conducted that have shown that there may be situations where there is a need to move from one regulatory program to another and this can be done without stopping the power unit. Therefore, it became necessary to synthesize and analyze an automated system for regulating the power of the NPP unit, which allows to maintain the characteristic technological parameter, which is selected depending on the applied control program without stopping the power unit.

In many works devoted to the problem of covering the variable part of load schedules, it is indicated that the increase of the share of nuclear power plants (NPP) in the total installed capacity requires increased maneuverability of power equipment of the NPP, that is, the operation of NPP power units in a variable mode. Any cyclical load of the equipment enhances the effect of wear, in the first place it affects the fuel elements. It is

known that in order to regulate the power of the power unit, there are three main control programs and their modifications. Support for technological parameters in accordance with each of the programs in different ways affects the wear of the equipment of the power unit. Studies have shown that there are possible situations when there is a need to switch from one regulation program to another, and this can be done without stopping the power unit.

Therefore, it became necessary to synthesize and analyze the automated power control system of the NPP, which allows maintaining a characteristic technological parameter, which is chosen depending on the applied program of regulation without stopping the power unit.

On the basis of the study, it was found that in terms of maintaining the power of electrical switching power are not equivalent, namely: the transition from the program of regulation  $p_{av} = \text{const}$  to  $t_{av} = \text{const}$  is accompanied by a 5% deviation of power. Reverse switching is accompanied by a power deviation of 1.1%. Therefore, when designing the power unit's algorithm, it is necessary to take into account the quality of the regulation and choose the best switching algorithm.

*Key words: NPP, power unit, control program, power, maneuvering MODE*

### **Постановка проблеми.**

У багатьох роботах, присвяченій проблемі покриття змінної частини графіків навантажень [1, с. 16-19; 2, с. 128-139], вказується, що підвищення частки атомних електростанцій (далі - АЕС) в загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС в змінному режимі. Будь-яка циклічність навантаження обладнання підсилює ефект зносу, в першу чергу це відбивається на тепловиділяючих елементах. Відомо, що для регулювання потужності енергоблоку існує три основних програми регулювання та їх модифікації. Підтримка технологічних параметрів відповідно до кожної з програм по-різному впливає на знос обладнання енергоблоку. Проведені дослідження показують, що можливі ситуації, коли виникає необхідність перейти з однієї програми регулювання на іншу, і це можна зробити без зупинки енергоблоку. Тому виникла необхідність синтезу та аналізу автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС, що дозволяє підтримувати характерний технологічний параметр, який вибирається залежно від застосовуваної програми регулювання без зупинки енергоблоку.

Таким чином, стаття присвячена аналізу перехідних процесів, що відбуваються в АСР потужності енергоблоку АЕС при зміні програм регулювання без зупинення енергоблоку.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В [3, с. 56-59] був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблоку. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУТП енергоблоку була розроблена математична модель [4, с. 104-106], за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблоку при різних програмах регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий регулятор потужності енергоблоку.

Основним керуючим впливом на енерговиділення в реакторі за новим алгоритмом є концентрація борної кислоти, а точніше атомів бору  $^{10}\text{B}$ . Результати дослідження АСР з таким регулятором наведені в ряді робіт.

Так, в роботі [5, с.22] показано, що використання борної кислоти для управління потужністю реакторної установки дозволяє значно збільшити час експлуатації тепловиділяючих елементів, підвищуючи економічність експлуатації АЕС без зниження показників безпеки.

В роботі [6, с. 18-24] наведені результати дослідження системи автоматичного регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС. Показана принципова можливість застосування стандартного ПІ-закону регулювання для керування нелінійним об'єктом.

Робота [7, с. 137-142] присвячена, дослідженню регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. Показано, що при регулюванні потужності реактора зміною концентрації борної кислоти реактор без регулятора є стійким на всіх рівнях потужності. Стійкість забезпечується регулятором аксіального офсету.

В роботі [8, с. 119-120] було запропоновано міру ефективності використання ядерного палива у вигляді виразу  $E_{\text{eff}} = f(\omega, B)$ . Де  $\omega$  — параметр пошкодження оболонки палива,  $B$  - глибина вигорання палива. Також було сформульовано завдання автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку: досягнення максимальної глибини вигорання палива при мінімальних пошкодженнях оболонки палива.

Досягти цієї мети можна за рахунок експлуатації енергоблоку АЕС на різних програмах та оптимальних переключеннях між ціми програмами.

Але яка буде якість перехідних процесів регулювання досліджено не було.

**Мета дослідження** — вивчення та аналіз перехідних процесів які виникають при зміні програм регулювання потужності енергоблоку під час його експлуатації.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

Виходячи з основної мети регулювання паросилова установки, яка полягає в підтримці рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії, впливає використання різних програм регулювання:

- з постійною середньою температурою теплоносія першого контуру, яка забезпечує стабільні температурні умови для його обладнання;
- з постійним тиском пари в другому контурі, яка також сприятлива для його обладнання;
- компромісно-комбінована, яка допускає експлуатацію енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в маневреному режимі.

Графіки зміння значень технологічних параметрів для різних програм регулювання потужності енергоблоку наведено на рисунку 1.

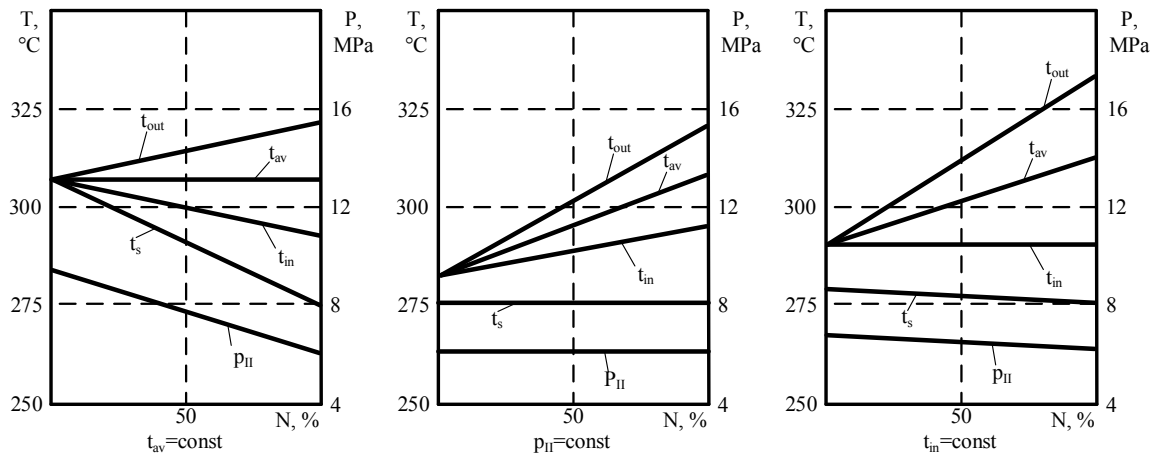


Рис. 1. Графіки зміння технологічних параметрів енергоблоку АЕС для різних програм регулювання.

Для реалізації всіх програм регулювання, та реалізації можливості переключення між програмами, запропоновано вдосконалену систему регулювання. Принципову схему якої наведено на рисунку 2.

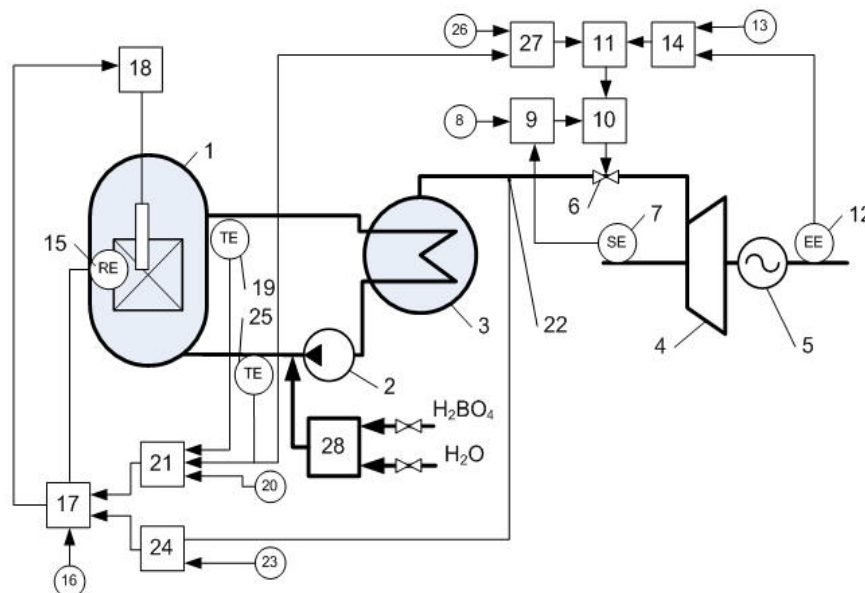


Рис. 2. Вдосконалена принципова схема АСР енергоблоку с реактором ВВЕР-1000

Вдосконалення полягає у використанні регулятора концентрації борної кислоти у теплоносії першого контуру (28). А також у алгоритмі роботи регуляторів 11, 17, 21 і 24. Докладний опис схеми наведено в [9].

На рисунку 3 наведено імітаційну модель автоматизованої системи регулювання, за допомогою якої досліджувались перехідні процеси при змінненні потужності енергоблоку та переведенні його з однієї програми регулювання на іншу.

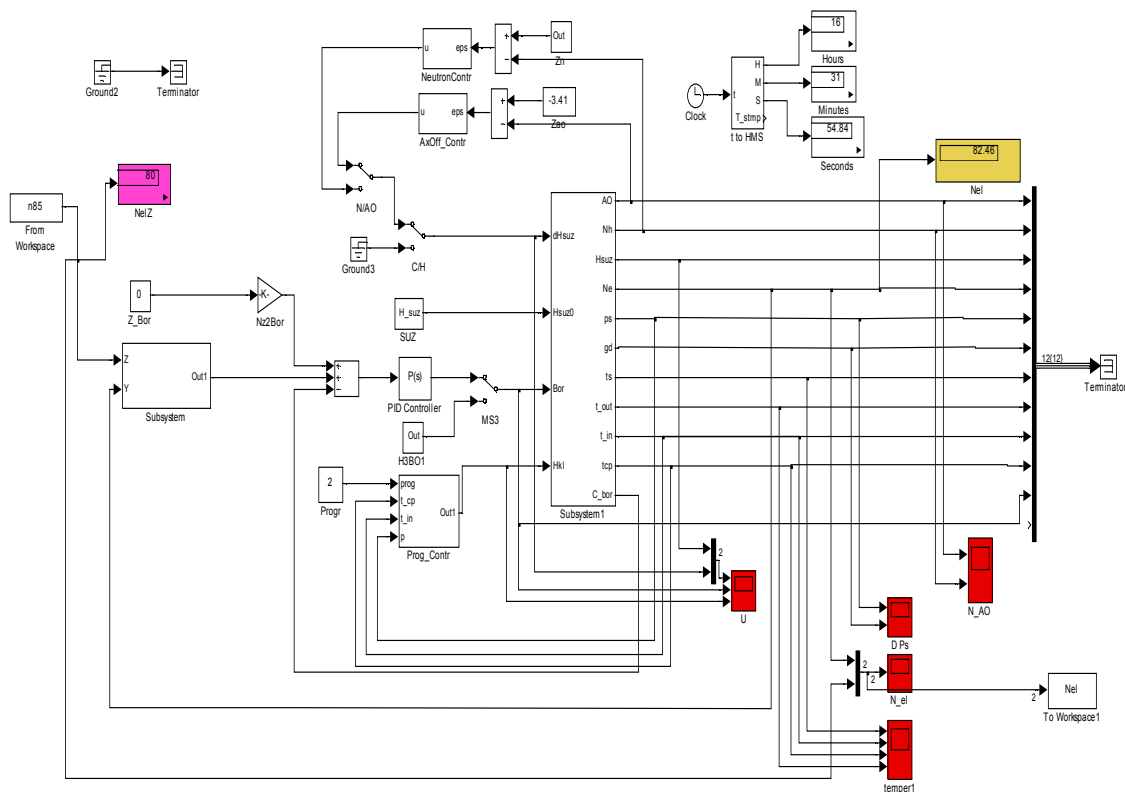


Рис.3. Імітаційна модель автоматизованої системи управління енергоблоком, яка реалізована в середовищі Simulink

На рисунку 4 наведено перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $p=\text{const}$  на  $t_{cp}=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 4.9%.

На рисунку 5 наведено перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{cp}=\text{const}$  на  $p=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 1.1%.

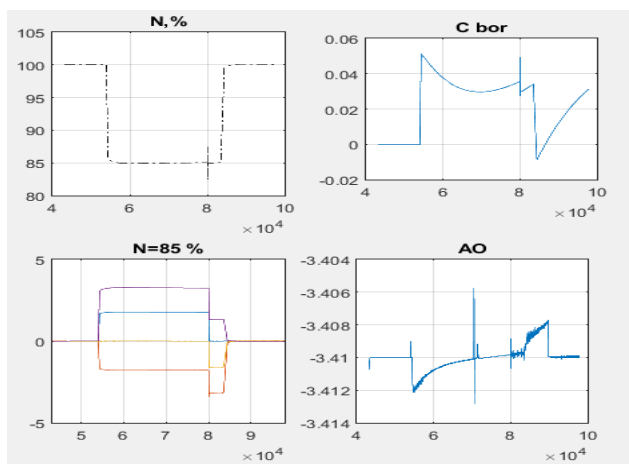


Рис. 4. Перехідний процес регулювання при  $p=\text{const}$  перехід на  $t_{cp}=\text{const}$

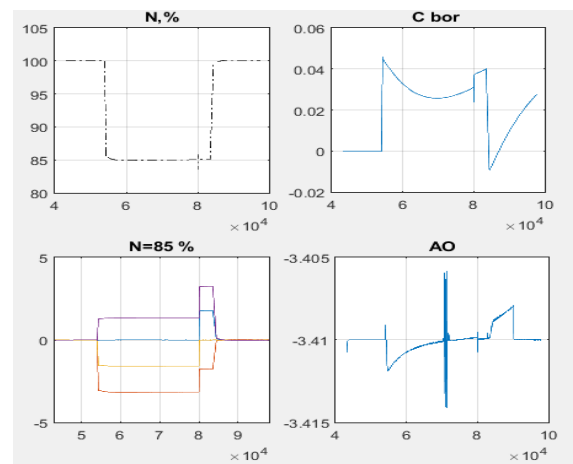


Рис. 5. Перехідний процес регулювання при  $t_{cp}=\text{const}$  перехід на  $p=\text{const}$

На рисунку 6 перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{cp}=\text{const}$  на  $t_{bx}=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 1.6%.

На рисунку 7 перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{bx}=\text{const}$  на  $p=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 2.9%.

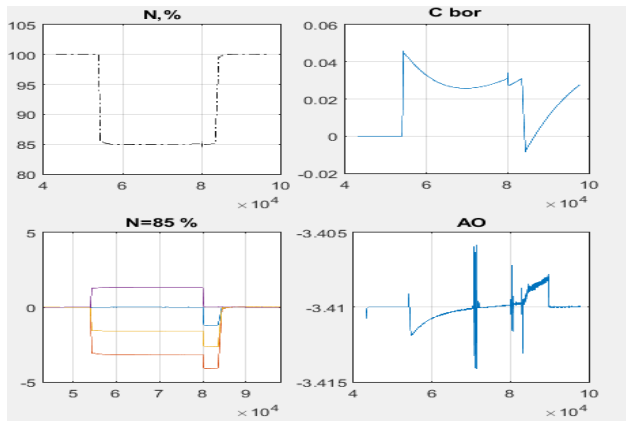


Рис. 6. Перехідний процес регулювання при  $t_{cp}=\text{const}$  перехід на  $t_{bx}=\text{const}$

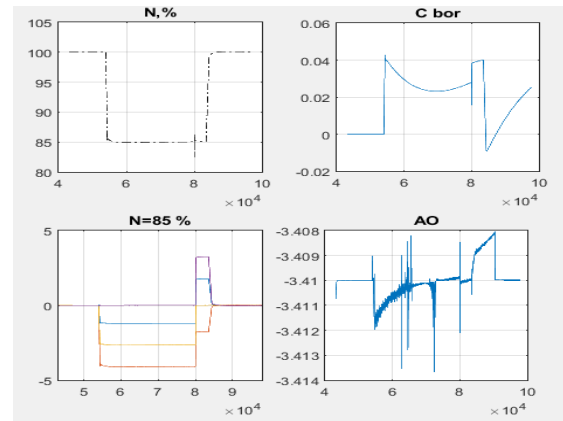


Рис. 7. Перехідний процес регулювання при  $t_{bx}=\text{const}$  перехід на  $p=\text{const}$

На рисунку 8 перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $p=\text{const}$  на  $t_{bx}=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 1.5%.

На рисунку 9 перехідний процес регулювання при маневруванні потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому під час зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{bx}=\text{const}$  на  $t_{cp}=\text{const}$ . З графіка видно, що відхилення потужності становить 2%.

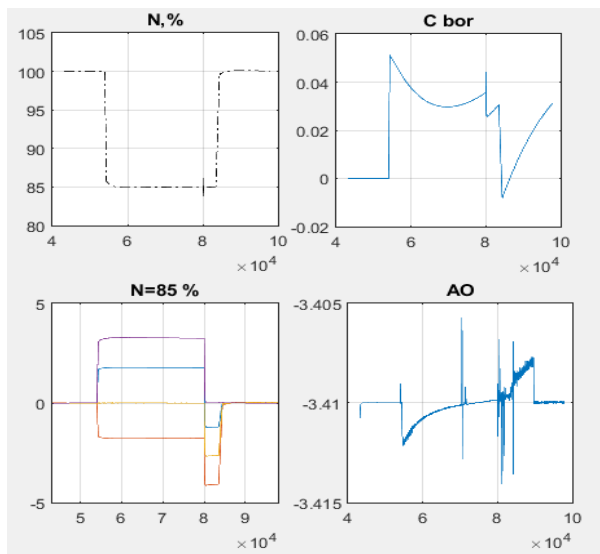


Рисунок 8 – Перехідний процес регулювання при  $p=\text{const}$  перехід на  $t_{bx}=\text{const}$

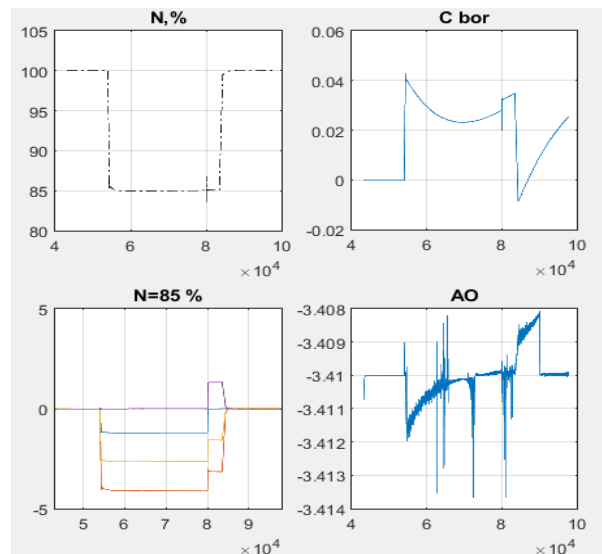


Рисунок 9 – Перехідний процес регулювання при  $t_{bx}=\text{const}$  перехід на  $t_{cp}=\text{const}$

У всіх випадках відхилення аксіального офсету не виходить за межі допустимих значень. Як було зазначено раніше, за підтримання цього параметру відповідає окремий регулятор. Тому мінімальні відхилення аксіального офсету – прогнозований факт.

Порівняння відхилень ОР СУЗ показує, що величина переміщення практично однаково для різних програм регулювання.

На основі вище викладеного можна зробити наступний висновок, що перемикання між програмами регулювання не є однаково ефективними з точки зору якості перехідного процесу. Для зручності подальшого аналізу алгоритму перемикання зведемо відхилення потужності в одну таблицю.



Таблиця 1. Відхилення потужності при зміні програми регулювання

| Перехід                     | Відхилення потужності |
|-----------------------------|-----------------------|
| $p_{cp} \rightarrow t_{cp}$ | 4.9 %                 |
| $t_{cp} \rightarrow p_{cp}$ | 1.1 %                 |
| $t_{cp} \rightarrow t_{bx}$ | 1.6 %                 |
| $t_{bx} \rightarrow p_{cp}$ | 2.9 %                 |
| $p_{cp} \rightarrow t_{bx}$ | 1.5 %                 |
| $t_{bx} \rightarrow t_{cp}$ | 2.0 %                 |

**Висновки.**

У роботі розглянуто технологічний процес регулювання потужності енергоблоку з порівнянням процесів регулювання при переключенні між різними програмами. З'ясовано що з точки зору якості підтримання потужності переключення не є еквівалентними, а саме: перехід з програми регулювання  $p_{cp} = \text{const}$  на  $t_{cp} = \text{const}$  супроводжується відхиленням потужності на 5%. Зворотне переключення супроводжується відхиленням потужності на 1.1%. Тому, при розробці алгоритму регулювання енергоблоку необхідно враховувати якість регулювання та обирати найкращий алгоритм переключення.

**Список використаної літератури**

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. 1974. № 6. С. 16-19.
2. Игнатенко Е. И., Пыткин Ю. Н. Маневренность реакторов типа ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 83 с.
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2007, Вып. 2(28). С. 56-59
4. M. V. Maksimov, K. V. Beglov, T. A. Tsiselskaya. A model of a power unit with WWER-1000 as an object of power control. *Works of the Odessa Polytechnic University*. Odessa, 2012. Rel. 1(38). P. 104-106.
5. Медведев Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальное керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Київ. 2002. № 2 (22). С. 22
6. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. Одеса. 2015. №4. С. 18–24.
7. Чмелев Е.И. Давидченко Д.В., Беглов К.В. Исследование каскадной автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока атомной электростанции. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 29. № 1. С. 137-142
8. Кокол Е.А. Оптимальное управление мощностью ВВЭР-1000 за счет целевого выбора программы регулирования. *Автоматика 2015: XXII Междунар. конф. по автоматическому управлению*. 10–11 сентября 2015 г. Одесса. – С. 119–120.
9. Одреховська С. О. Оптимізація перемикання статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР — 1000 в перехідних режимах експлуатації: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.13.07. Одеса, 2017. 20 с.

**References**

1. Berkovich V.M., Gorohov V.F., Tatarnikov V.P. O vozmozhnosti regulirovaniya moschnosti energosistemyi s pomoschyu atomnyih elektrostantsiy. *Teploenergetika*. 1974. # 6. S. 16-19.
2. Ignatenko E. I., Pyitkin Yu. N. Manevrennost reaktorov tipa VVER. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 83 s.
3. Baskakov V.E. Algoritmy ekspluatatsii energobloka s VVER v podderzhanii sutochnogo balansa moschnosti energosistemyi. *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*. Odessa, 2007, Vyp. 2(28). S. 56-59
4. M. V. Maksimov, K. V. Beglov, T. A. Tsiselskaya. A model of a power unit with WWER-1000 as an object of power control. *Works of the Odessa Polytechnic University*. Odessa, 2012. Rel. 1(38). P. 104-106.
5. Medvediev R.B., Sanhinova O.V. Optymalne keruvannya protsesom zminy kontsentratsii boranoi kysloty v teplonosii pershoho konturu AES z VVER-1000. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. Kyiv. 2002. № 2 (22). S. 22



6. Behlov K.V., Voloshkina O.O., Plakhotniuk O.A. Doslidzhennia rehuliatora kontsentratsii ridkoho pohlynacha enerhobloku AES. Avtomatyzatsiya tekhnolohycheskykh y byznes-protsesov. Odesa. 2015. №4. S. 18–24.
7. Chmelev E.I. Davidchenko D.V., Beglov K.V. Issledovanie kaskadnoy avtomatizirovannoy sistemyi regulirovaniya moschnosti energobloka atomnoy elektrostantsii. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. T. 29. № 1. S. 137-142
8. Kokol E.A. Optimalnoe upravlenie moschnostyu VVER-1000 za schet tselevogo vyibora programmyi regulirovaniya. Avtomatika 2015:XXII Mezhdunar. konf. po avtomaticheskomu upravleniyu. 10–11 sentyabrya 2015 g. Odessa. S. 119–120.
9. Odrekhovska Ye. O. Optymizatsiia peremykannia statychnykh prohram rehuliuвання potuzhnosti YaEU z VVER — 1000 v perekhidnykh rezhymakh ekspluatatsii: avtoref. dys. na zdobuttia naukovoho stupenia kand. tekhn. nauk: 05.13.07. Odesa, 2017. 20 s.

УДК 681.3.06:330.322.54

В.І. ДУБРОВІН

Національний ун-т «Запорізька політехніка», к.т.н, професор

О.І. ЮСКІВ

ПрАТ «Дніпрспецсталь», адміністратор задач

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Виявлені проблеми енергозбереження та управління виробничими витратами на підприємствах металургійного комплексу. Обґрунтовано необхідність проведення політики енерго- та ресурсозбереження виробниками металопродукції, позначені напрямки енергозбереження на рівні підприємств для підвищення ефективності їх роботи.

Конкретизоване поняття «енергозбереження» на промисловому підприємстві, що відрізняється включенням розширеного комплексу заходів, спрямованих на скорочення обсягу використовуваних паливно-енергетичних ресурсів, інтенсифікацію їх використання і, як наслідок, підвищення ефективності діяльності підприємства.

Об'єктом дослідження є металургійні підприємства, що реалізують енергозберігаючі заходи.

Розглянуті моделі реалізації програм енергозбереження на металургійних підприємствах – структурована їх система цілей, а також визначені основні механізми реалізації успішних програм на металургійних підприємствах.

Виявлено особливості управління енергозбереженням через організацію системи енергоменеджменту на підприємстві, заснованої на операційному управлінні процесами енергозабезпечення, енергоспоживання і реалізації енергозберігаючих заходів за напрямками їх здійснення.

Розроблено модель, яка включає систему цілей і збалансованих показників розвитку, на основі яких формується основний цикл управління (моніторингу) програми. Програма інноваційного розвитку містить ряд взаємопов'язаних проектів або їх портфелів, реалізація яких забезпечує досягнення цілей. При цьому інноваційна платформа програми розвитку буде будуватися на нових знаннях і технологіях, що надходять із зовнішнього середовища.

Реалізація обґрунтованих в роботі концептуальних положень дозволить промисловим підприємствам управляти процесами енергозбереження, оцінювати вплив інтегративних факторів розвитку на ефективність підприємства, підвищувати стійкість економічного зростання і розробляти стратегії свого розвитку на довгостроковий період.

Ключові слова: енергозбереження, ресурсозбереження, управління витратами, чорна металургія, собівартість, ефективність металургійного виробництва, енергоємність.

В.І. ДУБРОВІН

Национальный ун-т «Запорожская политехника», к.т.н, профессор

О.И. ЮСКІВ

ЧАО «Днепрспецсталь», администратор задач

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА МЕТАЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Вывявлены проблемы энергосбережения и управления производственными затратами на предприятиях металлургического комплекса. Обоснована необходимость проведения политики энерго- и ресурсосбережения производителями металлопродукции, обозначены направления энергосбережения на уровне предприятий для повышения эффективности их работы.

Уточнено понятие «энергосбережение» на промышленном предприятии, отличающееся включением расширенного комплекса мер, направленных на сокращение объема используемых топливно-энергетических ресурсов, интенсификацию их использования и, как следствие, повышение эффективности деятельности предприятия.

Объектом исследования являются металлургические предприятия, реализующие энергосберегающие мероприятия.

Рассмотрены модели реализации программ энергосбережения на металлургических предприятиях - структурированная их система целей, а также определены основные механизмы реализации успешных программ на металлургических предприятиях.

Выявлены особенности управления энергосбережением через организацию системы энергоменеджмента на предприятии, основанной на операционном управлении процессами энергообеспечения, энергопотребления и реализации энергосберегающих мероприятий по направлениям их осуществления.

Разработана модель, которая включает систему целей и сбалансированных показателей развития, на основе которых формируется основной цикл управления (мониторинга) программы. Программа инновационного развития содержит ряд взаимосвязанных проектов или их портфелей, реализация которых обеспечивает достижение целей. При этом инновационная платформа программы развития строится на новых знаниях и технологиях, поступающих из внешней среды.

Реализация обоснованных в работе концептуальных положений позволит промышленным предприятиям управлять процессами энергосбережения, оценивать влияние интенсификационных факторов развития на эффективность предприятия, повышать устойчивость экономического роста и разрабатывать стратегии своего развития на долгосрочный период.

Ключевые слова: энергосбережение, ресурсосбережение, управление затратами, черная металлургия, себестоимость, эффективность металлургического производства, энергоемкость.

V.I. DUBROVIN

National Unitary Enterprise "Zaporozhye Polytechnic", Ph.D., Professor

O. I. YUSKIV

PJSC "Dniprospsststal", task manager

## MANAGEMENT OF PROCESSES OF ENERGY SAVING AT METALLURGICAL ENTERPRISES

*The revealed problems of energy saving and management of production costs at the enterprises of the metallurgical complex. The necessity of carrying out the policy of energy and resource saving by manufacturers of metal products is substantiated, the directions of energy saving at the level of enterprises are indicated for increasing the efficiency of their work.*

*The concept of "energy saving" at an industrial enterprise has been clarified, distinguished by the inclusion of an expanded set of measures aimed at reducing the amount of fuel and energy resources used, intensifying their use and, as a consequence, increasing the efficiency of the enterprise.*

*The object of research is metallurgical enterprises that implement energy-saving measures.*

*The models of implementation of energy saving programs at metallurgical enterprises are considered - their system of goals is structured, as well as the main mechanisms of implementation of successful programs at metallurgical enterprises are determined.*

*The features of energy saving management through the organization of the energy management system at an enterprise based on the operational management of energy supply processes, energy consumption and the implementation of energy saving measures in the areas of their implementation are revealed.*

*A model has been developed that includes a system of goals and balanced development indicators, on the basis of which the main management cycle (monitoring) of the program is formed. The innovative development program contains a number of interrelated projects or their portfolios, the implementation of which ensures the achievement of goals. At the same time, the innovation platform of the development program is based on new knowledge and technologies coming from the external environment.*

*The implementation of substantiated in the work of the conceptual provisions will enable industrial enterprises to manage energy saving processes, to assess the impact of integration factors on development on the efficiency of the enterprise, to increase the sustainability of economic growth and to develop strategies for its development over the long run.*

*Key words: energy saving, resource conservation, cost management, ferrous metallurgy, cost price, efficiency of metallurgical production, energy intensity.*

### Постановка проблеми

Сучасний стан металургійного виробництва відображає глобальні процеси, які відбуваються у світовій економіці. В результаті концентрації капіталу та виробництва формуються великі інтегровані підприємства, що володіють значними фінансовими ресурсами, які дозволяють їм здійснювати економічну експансію в країнах з відносно дешевими сировинними матеріалами та трудовими резервами [1]. В результаті цього в таких країнах, до яких слід віднести і Україну, відбувається різке збільшення обсягів випуску продукції, для виробництва якої потрібна велика кількість мінеральних та паливно-

енергетичних ресурсів (ПЕР), і як наслідок – виснаження власних запасів природної сировини та неконтрольоване утворення техногенних відходів [2].

На розвиток промислових об'єктів України негативний вплив становить високий відсоток енергетичних витрат, який в середньому становить 8-12% [3]. Висока енергоємність металургійних підприємств при постійному підвищенні цін на ПЕР ставить проблеми енергоресурсозбереження на перше місце.

Чорна металургія вважається найбільш енергоємною галуззю промисловості. Доля витрат на ПЕР в загальних заводських витратах на виробництво продукції складає понад 30 % [4]. Найбільшими споживачами палива на виробництвах є доменні та прокатні виробництва. До електроємних виробництв відносяться – електросталеплавильні виробництва, кисневі станції, а основним споживачем теплоти вважається коксохімічне виробництво [1].

Особливість потенціалу енергозбереження на металургійних підприємствах полягає в тому – на сьогоднішній момент існує високий відсоток морального та фізичного зносу основного енерготехнологічного обладнання, а також спостерігається істотна неритмічність роботи металургійних комбінатів. Ці два фактори разом з проблемою системи обліку та контролю за витратами ПЕР, які потребують корінного поліпшення на усіх рівнях виробництва є основою нераціональних втрат ПЕР в промисловості (до 70 % від потенціалу енергозбереження) [5].

Для металургійних заводів проблема енергозбереження є однією з напрямків для зниження затрат виробництва та підвищення конкурентоспроможності їх продукції на ринку [6]. Для вирішення цих завдань необхідно мати стратегію розвитку підприємства, яка нерозривно пов'язана з основними напрямками енерго- та ресурсозбереження.

Названі фактори є основою формування концептуальних положень енергозбереження на підприємствах чорної металургії, які б відповідали сучасному стану галузі в цілому.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Проблемами управління перспективним енергоспоживанням підприємств займалися і займаються як наші, так і зарубіжні вчені. Енергоємність виробництва промислового підприємства як об'єкт вивчення розглядається ними комплексно, з урахуванням багатьох чинників, що цілком закономірно для такого складного об'єкта. Дослідження резервів енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності виробничих процесів підприємств присвячені праці багатьох вітчизняних вчених: В. Ануфрієва, Л. Богачкова та ін. Багато уваги приділяється процесу формування та оцінки паливно-енергетичного балансу промислового підприємства при оцінці енергоефективності та енергозбереження в працях Н. Віленського, А. Макарова, Л. Мелентьєва [5].

Разом з тим серед публікацій у напрямку дослідження практично невідомі роботи з оцінки якості паливно-енергетичного балансу металургійного підприємства як результату взаємодії бізнес-стратегії і стратегії енергоефективності. Тому питання відповідності енергоефективності та енергозбереження сукупності структурних, функціональних і ресурсних складових металургійного підприємства динамічної ринкової середовищі вимагають вивчення та осмислення з точки зору комплексного управління перспективним енергоспоживанням для забезпечення сталого соціально-економічного розвитку підприємства і підвищення його конкурентоспроможності на ринку.

#### **Мета дослідження**

Ціллю даної роботи є розвиток теоретичних і методологічних положень комплексного управління перспективним енергоспоживанням металургійних підприємств в умовах ринкової кон'юнктури.

Об'єктом дослідження є металургійні підприємства, що реалізують енергозберігаючі заходи.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Останнім часом, тенденція зростання ресурсоємності металургійної промисловості та, відповідно, істотне збільшення екологічного навантаження, яке впливає на навколишнє середовище висувають на передній план проблеми, які пов'язані з керуванням процесами енерго- і ресурсозбереження. Підвищення енергетичної та загальної ресурсної ефективності промислового виробництва через впровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологій стає завданням першорядної важливості особливо для енергоємних галузей промисловості, таких як чорна металургія [5].

Енергозбереження – здійснення організаційних, правових, наукових, виробничих, технічних і фінансових заходів, які орієнтовані на обмеження розміру паливно-енергетичних ресурсів, інтенсифікацію їх застосування, в необхідній кількості за рахунок залучення відновлюваних джерел енергії при одночасному підвищенні результату від їх застосування, показників ефективності діяльності підприємства.

Структура споживання енергії на металургійному підприємстві орієнтована в основному на використанні палива, яке широко застосовується на всіх стадіях металургійного виробництва, зображена на рис. 1 [6].

Витрати енергії на виробництво продукції визначаються енергоємністю – один із найважливіших показників виробництва, оскільки визначає його ефективність та безпосередньо впливає на собівартість продукції [7].

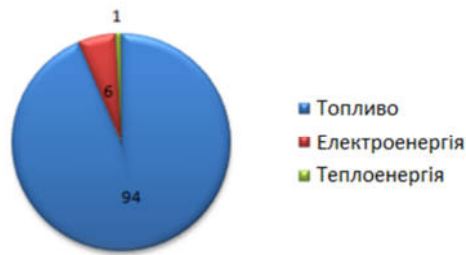


Рис. 1 – Структура споживання енергії в % на металургійних підприємствах

Для металургії питання енергозбереження – одне з основних напрямів зниження витрат виробництва.

Крім того, в умовах зростаючої конкуренції в металургійній галузі зниження цін на енергоємну металопродукцію за рахунок оптимізації споживання енергетичних ресурсів та зменшення енергетичної складової витрат виробництва є одним з найважливіших факторів, які визначають фінансово-економічний стан підприємств металургійної промисловості та їх сталий розвиток на світовому ринку [8]. Найбільш важливими напрямками в здійсненні перманентної енергозберігаючої політики, а значить і політики зниження витрат на виробництво металопродукції для виробників енергоємних чорних металів базується на:

1. застосуванні більш сучасних (менш енергоємних) технологій та енергоекономічного технологічного обладнання;
2. виборі тарифів та постачальників енергоресурсів;
3. зниженні споживання енергоресурсів за рахунок вдосконалення існуючих технологічних процесів та режимів роботи обладнання шляхом впровадження модульних систем управління енергією і виробничими витратами, моніторингу енергетичних витрат і заходів по зниженню викидів в навколишнє середовище є:
  - вдосконалення системи енергетичного менеджменту на підприємстві;
  - збільшення частки власного виробітку електроенергії (собівартість вироблення електроенергії на власних електростанціях в 2-2,5 рази нижчі за тарифи на придбану електроенергію) [9];
  - оптимізація енергобалансу підприємства та його підрозділів.
4. нормування і прогнозування споживання енергоресурсів на основі математичних моделей;
5. використання власних вторинних ресурсів і витіснення за рахунок цього покупних.

Перераховані вище напрямки зниження енерговитрат та підвищення ефективності металургійного виробництва представлені у вигляді структурної схеми вирішальних чинників енергозбереження (рис. 2) [8].



Рис. 2. – Фактори енергозбереження, які визначають ефективність роботи металургійного підприємства

Посилення ролі енергоресурсозбереження на всіх рівнях управління економікою, в тому числі на рівні окремих промислових підприємств, спричинить за собою зміну економічної оцінки енергетичної ефективності та загальної економічної ефективності виробництва, що враховує також ефективність використання виробничих фондів і трудових ресурсів з урахуванням інтенсивних факторів зростання [5].

Для вирішення цих завдань потрібно мати стратегію становлення компанії, яка міцно пов'язана з головними напрямками енерго- і ресурсозбереження.

До важливих завдань програм енергозбереження, відносяться розробка методології визначення величини збереження енергетичних ресурсів, в результаті впровадження енергозберігаючих технологій, встановлення узагальнюючих показників, які характеризують роботу підприємств в області зниження питомої витрати енергоресурсів [7]. Результатами інноваційних програм енергозбереження є раціональне використання резервів енергоресурсів, визначення пріоритетних напрямів економії енергоресурсів.

Аналіз енергозбереження включає комплексну оцінку рівня споживання енергетичних ресурсів, формування комплексу узагальнюючих показників, які вказують на використання кожного виду ресурсів окремо, вивчення впливу різних чинників на рівень використання виробничих ресурсів, розкриття невикористаних резервів.

Для ефективного управління інноваційними проектами енергозберігаючих технологій в металургії потрібна розробка нових концепцій управління, які базуються на формуванні інноваційних платформ та активному використанні кращого світового досвіду. Концептуальна модель управління програмами інноваційного становлення систем енергозбереження показана на рис.3.

Модель складається з системи цілей та показників розвитку, на їх основі будується цикл управління (моніторингу) програми. Програма інноваційного розвитку охоплює ряд взаємопов'язаних планів або їх портфелів, їх здійснення гарантує досягнення цілей. Проекти будуються на базі найкращих практик і уроків, які утворюються за допомогою двох когнітивних циклів. Інноваційна платформа вказаної програми будується на нових знаннях та технологіях, які подаються із зовнішнього середовища та на когнітивних знаннях кращої практики уроків реалізації проектів. В рамках запропонованої концептуальної моделі необхідно збалансувати систему цілей інноваційних програм.



Головні концептуальні положення підвищення енергоефективності та оптимального застосування матеріальних ресурсів в металургії:

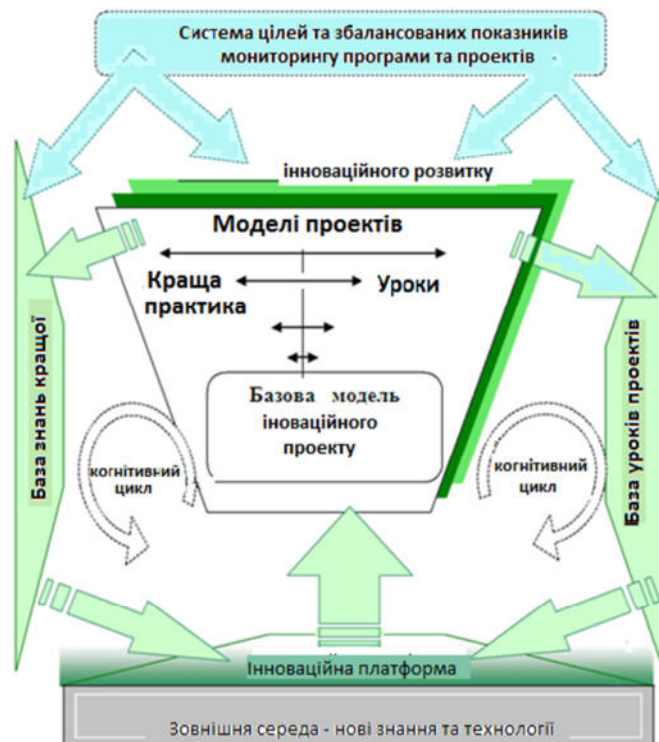


Рис. 3. – Концептуальна модель управління програмами інноваційного розвитку систем енергозбереження

✓ **Здійснення комплексу організаційно-технічних заходів**, вдосконалення управління – корінне удосконалення системи обліку і контролю витрат ПЕР на всіх рівнях виробництва (найбільш повний моніторинг енергоспоживання), координація дій різних служб і виробництв, велика частота профілактичних ремонтів обладнання, підвищення якості підготовки фахівців і т.п. [7]. Здійснення таких заходів, є і окупається швидко, тому їх здійснення вважається основним завданням.

✓ **Ремонт, налагодження та заміна устаткування.**

Правильний вибір енергоносіїв. Кожен процес потрібен мати такий енергоносіє, щоб забезпечити найбільший енергетичний та економічний ефект. Вид енергоносія обирають, порівнюючи варіанти та комплексно аналізуючи наступні фактори:

- а) вимоги з боку технології (зміна якості продукції, яка випускається, витрата сировини та ін.);
- б) економічні відмінності в конструкції і умовах експлуатації устаткування;
- в) витрати на порівнювані енергоносії;
- г) наявність необхідного устаткування;
- д) необхідний період часу для здійснення заміни устаткування;
- е) економічний ефект від використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР), витрати на екологічні заходи.

Витрати за цими варіантами визначають за виразом 1 [6]:

$$Z = \sum K_{\Pi} + V_{\Pi} + E_{\Pi} \Pi Z_{\Pi E} - \sum \Delta Z_i \quad (1)$$

де  $K_{\Pi}$  – капітальні витрати на цю технологічну установку без урахування витрат на установки використання ВЕР;

$V_{\Pi}$  – експлуатаційні витрати без енергетичної складової;

$E_{\Pi}$  – питома витрата енергоресурсів;

$\Pi$  – річний випуск продукції;

$Z_{\Pi E}$  – приведені питомі витрати на енергоносії;

$\sum \Delta Z_i$  – ефект від використання ВЕР.

✓ **Підвищення рівня утилізації вторинних енергоресурсів (ВЕР).**

Підвищення рівня утилізації ВЕР на металургійному підприємстві з повним циклом можна виділити наступну структуру виготовлення та можливого використання ВЕР. Ефективне використання

ВЭР дозволяє заміщати покупні ПЕР, що значно знижує енергоємність і собівартість продукції [2]. Так, наприклад:

- використання коксового, доменного газу на власній ТЕЦ дозволяє значно понизити до  $2 \div 3$  разів собівартість електроенергії і пари;
- утилізація теплоти при сухому гасінні коксу (УСТК) на котлах-утилізаторах з установкою парових турбін для вироблення електроенергії;
- попереднє підігрівання вугільної шихти газами, які відходять, дозволяє знизити витрати топлива на 70 Мкал на 1 тону коксу;
- в доменному виробництві утилізація ВЭР дозволяє значно знизити витрати ПЕР на 1 тону чавуну (до 3,5 Гкал/т), рівень утилізації на сьогодні складає  $\sim 30 \div 32 \%$  [3];
- в металургійному виробництві питома вага електроенергії на ( $15 \div 30 \%$ ) більша, ніж в країнах ЄС, це пов'язано з реалізацією застарілої технології;
- використання доменного або коксового газу в нагрівальних печах прокатного виробництва дозволяє істотно знизити витрати природного газу та до 20 % зменшити собівартість продукції;
- максимальне використання ВЭР вимагає певного порядку, який дозволяє планувати вихід ВЭР з необхідними параметрами, створення режимних карт споживання, погодженого і оперативного управління потоками ВЭР. Безвідходне використання ВЭР та впровадження енергозберігаючих заходів вирішує екологічні проблеми на підприємствах та дозволяє знизити кількість шкідливих викидів в атмосферу.

✓ **Впровадження новітніх високоефективних енергозберігаючих технологій та оснащення.** Напевно більш дорогоцінна частина, яка пов'язана зі значними вкладеннями.

Енергоефективність виробництва відображається в результативності виготовлення через співвідношення результатів виробничої діяльності та витрачених на їх придбання економічно, технічно і технологічно аргументованих розмірів енергетичних ресурсів в умовах енергозберігаючої та екологічно прийнятною інтенсифікації промислового виготовлення [2].

Сутність процесу збільшення енергоефективності виробництва полягає в зниженні витрат на одиницю продукції енергоносіїв на створення продукції, в раціоналізації режимів енергоспоживання, зміні текстури енергоспоживання, підвищення природного ефективности виготовлення.

Перелік проектів, які вимагають певних інвестицій:

1. створення АСКУЭ .;
2. модернізація системи забезпечення продуктами розділення повітря із заміною морально застарілих розподільних установок;
3. модернізація власних джерел енергії з метою збільшення вироблення електроенергії на заводі;
4. використання установок турбогенераторів замість БРОУ та впровадження їх в схемах котлів-утилізаторів;
5. використання енергії стислого природного газу;
6. модернізація ГУБТ;
7. установка газових турбін з котлами-утилізаторами (ПГУ);
8. використання ПУТ в доменних печах з метою скорочення витрати коксу;
9. збільшення об'єму розливання сталі на машинах безперервного лиття (МНЛЗ).

У доменному виробництві актуально зниження витрати коксу на тону виплавленого чавуну (вартість коксу складає до 60% вартості чавуну). Це досягається, наприклад, за рахунок використання природного газу, збагачення дуття киснем, вдування пиловугільного палива як часткового замітника коксу.

У сталеплавильному виробництві доцільна заміна мартенівських печей двохванними сталеплавильними агрегатами, подальший розвиток конвертерного, електростале-плавильного виробництва та позапічної обробки сталі.

У прокатному виробництві необхідно здійснити широке впровадження технології безперервного лиття заготовок.

До теперішнього часу на металургійних заводах не використовується фізичне тепло доменного газу (температура газу близько  $300^{\circ}\text{C}$ ) [7], на більшості заводів не використовується потенційна енергія тиску доменного газу.

Не використовується фізичне тепло коксу, для його використання необхідно подальше будівництво установок сухого гасіння коксу.

Конвертерний газ відводиться з повним допалюванням, не використовується як паливо.

На ряді підприємств є можливості більш повного використання фізичного тепла готового продукту в наступних технологічних рамках: чавуну в сталеплавильному виробництві, а сталі – в прокатному.

Якісне енергетичне обстеження підприємства дозволяє отримати досить повну інформацію про можливе підвищення ефективності використання ПЕР і, як правило, воно націлене на забезпечення керівництва компанії об'єктивною інформацією по фактичному використанню енергії.

Крім того, таке обстеження дозволяє отримати додаткову інформацію, яка на підприємстві, як правило, не аналізується (скласти структуру енергоспоживання по підрозділах; виявити основні чинники, які впливають на споживання енергії; визначити втрати ПЕР; оцінити ефективність роботи найбільш енергоємних установок та ін.). Причому така інформація збирається не лише за свідченнями приладів, але і, що досить важливо, за результатами співбесіди з головними фахівцями, інженерами і робітниками технологічних служб і служб головного енергетика.

Використання цієї інформації дозволяє отримати об'єктивну картину по витраті ПЕР і розробити ефективну програму енергозбереження.

### Висновки

1. Проаналізовано особливості управління енергозбереженням через організацію системи маркетингу на підприємстві, заснованої на операційному управлінні процесами енергозабезпечення, енергоспоживання та реалізації енергозберігаючих технологій згідно напрямкам їх втілення.

2. Реалізація аргументованих концептуальних положень дозволить промисловим підприємствам управляти напрямками енергозбереження, розцінювати вплив інтенсифікованих факторів розвитку на ефективність компанії, збільшувати стійкість економічного підйому та розробляти стратегії власного розвитку на довгостроковий період.

3. Розроблено модель, яка містить систему цілей та збалансованих показників розвитку, на базі яких створюється головний цикл управління (прогнозу) програми. Програма інноваційного розвитку охоплює ряд взаємопов'язаних планів або їх портфелів, здійснення яких гарантує досягнення цілей. При цьому інноваційна платформа програми буде вибудовуватися на новітніх знаннях і технологіях, що надходять із зовнішнього середовища.

### Список використаної літератури

1. Буданов И. Н. Проблемы черной металлургии. Экономист, 2007. 26–37 с.
2. Седых А.М., Юзов О.В. Анализ производственно-хозяйственной деятельности металлургических предприятий: учебное пособие для вузов. 2-е изд. доп. и перераб. М.: МИСИС, 2005. 360 с.
3. Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Энциклопедия энергосбережения. Екатеринбург: ИД «Сократ», 2002. 352 с.
4. Ачкасов И.А. Управление проектами та розвиток виробництва: зб.наук.пр. Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2007. С. 25–31.
5. Bettinger, D. Efficient Energy Use Pays Off /D. Bettinger, F. Hartl // Metals & Mining. – 2016. – № 2. – P. 5–7.
6. Semko, I. B. (2016) Osoblyvosti upravlinnya proektamy v enerhetychniy haluzi [Features of project management in the energy industry]. Shidno-Evropejs'kyj zhurnal peredovyh tehnologij, 1.49, 46– 47.
7. “Energy conservation in metallurgy,” Inform. Byull. Mezhdunarod. Soyuz. Metallurgov, No. 9, 1–2 (2015).
8. Zlobin, V. N. Kuryatov, A. P. Mal'tsev, and G. A. Romanov, “The most important concepts in energy conservation at factories in ferrous metallurgy,” ESKO — Elektron. Zh. Energoservisnoi Kompanii Ekologicheskie sistemy, No. 5 (2016).
9. L. A. Koptsev and I. A. Yarpryntseva, “Modeling fuel consumption at the Magnitogorsk Metallurgical Combine,” Prom. Energetika, No. 5, 2–6 (2004).

### References

1. Budanov I. N. Problemyi chernoy metallurgii. Ekonomist, 2007. 26–37 s.
2. Sedyih A.M., Yuzov O.V. Analiz proizvodstvenno-hozyaystvennoy deyatel'nosti metallurgicheskikh predpriyatiy: uchebnoe posobie dlya vuzov. 2-e izd. dop. i pererab. M.: MISIS, 2005. 360 s.
3. Danilov N.I., Schelokov Ya.M. Entsiklopediya energosberezheniya. Ekaterinburg: ID «Sokrat», 2002. 352 s.
4. Achkasov Y.A. Upravlinnia proektamy ta rozvytok vyrobnytstva: zb.nauk.pr. Luhansk: vyd-vo SNU im. V.Dalia, 2007. S. 25–31.
5. Bettinger, D. Efficient Energy Use Pays Off /D. Bettinger, F. Hartl // Metals & Mining. – 2016. – № 2. – P. 5–7.
6. Semko, I. B. (2016) Osoblyvosti upravlinnya proektamy v enerhetychniy haluzi [Features of project management in the energy industry]. Shidno-Evropejs'kyj zhurnal peredovyh tehnologij, 1.49, 46– 47.
7. “Energy conservation in metallurgy,” Inform. Byull. Mezhdunarod. Soyuz. Metallurgov, No. 9, 1–2 (2015).
8. A. A. Zlobin, V. N. Kuryatov, A. P. Mal'tsev, and G. A. Romanov, “The most important concepts in energy conservation at factories in ferrous metallurgy,” ESKO — Elektron. Zh. Energoservisnoi Kompanii Ekologicheskie sistemy, No. 5 (2016).
9. L. A. Koptsev and I. A. Yarpryntseva, “Modeling fuel consumption at the Magnitogorsk Metallurgical Combine,” Prom. Energetika, No. 5, 2–6 (2004).

УДК 621.452-192

С.В. ЄМЕЛЬЯНОВ, Л.С. ФОНАР, М.О. БАРАБАНОВ

Одеський національний політехнічний університет

**СИНХРОННО-ГРЕБІНЧАСТИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ РЕГУЛЯРНИХ КОМПОНЕНТІВ У ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛАХ РОТОРНИХ МАШИН**

Запропоновано спосіб побудови синхронно-гребінчастого фільтра, здатного виділяти регулярні компоненти із цілою й нецілою кратністю у віброакустичній сигналах роторних машин. Розглянуті особливості застосування синхронно-гребінчастого фільтра в складі цифрових сигнальних процесорів. Запропонований метод побудови синхронно-гребінчастого фільтра дозволяє виконувати виділення регулярних компонент з нецілою кратністю щодо частоти обертання ротора. Застосована паралельна структура спрощує формування загальної амплітудно-частотної характеристики. Визначено динамічний діапазон вихідного сигналу і вплив особливостей умов обчислень в складі цифрових сигнальних процесорів. Отримані в ході роботи результати мають практичну цінність для аналізу процесів, що відбуваються в обладнанні.

Ключові слова: вібрація, технічна діагностика, синхронно-гребінчастий фільтр, фільтр з декількома смугами пропускання.

С.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л.С. ФОНАРЬ, Н.А. БАРАБАНОВ

Одесский национальный политехнический университет

**СИНХРОННО-ГРЕБЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ КОМПОНЕНТ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ РОТОРНЫХ МАШИН**

Предложен способ построения синхронно-гребенчатого фильтра, способного выделять регулярные компоненты с целой и нецелой кратностью в виброакустических сигналах роторных машин. Рассмотрены особенности применения синхронно-гребенчатого фильтра в составе цифровых сигнальных процессоров. Предложенный метод построения синхронно-гребенчатого фильтра позволяет выполнять выделение регулярных компонент с нецелой кратностью частоты вращения ротора. Применяемая параллельная структура упрощает формирование общей амплитудно-частотной характеристики. Полученные в ходе работы результаты имеют практическую ценность для анализа процессов, происходящих в оборудовании.

Ключевые слова: вибрация, техническая диагностика, синхронно-гребенчатый фильтр, фильтр с несколькими полосами пропускания.

S.V. YEMELYANOV, L.S. FONAR, M. A. BARABANOV

Odessa National Polytechnic University

**SYNCHRONOUSLY-COMB FILTER FOR THE ALLOCATION OF REGULAR FEATURE IN THE VIBROACOUSTIC SIGNALS OF ROTATING MACHINES**

The purpose of the work is to construct a synchronous-comb filter that can allocate regular components with integer and non-integer multiplicities relative to the rotor rotation frequency and the determination of the features of the synthesis of synchronous-comb filter for use in the composition of digital signal processors. A method for constructing a synchronous-comb filter capable of extracting regular components with whole and non-integer multiplicity in vibro-acoustic signals of rotary machines is proposed.

In the course of adjustment work on mechanical adjustment of the fixed and rotating parts of the rotary machine, with the constant rotor frequency, in the spectrum of the vibration signal, the regulatory components were fixed, which decreased with the successful completion of the mechanical adjustment, or remained unchanged in the presence of mechanical damage that developed.

Creation of generalized models of measurable parameters that take into account the possibility of describing the manifestations of dynamic activity is always relevant. Using the obtained models, we can evaluate the properties of measured signals to detect the fact of the availability of a source of dynamic activity and the possible mechanism of its occurrence. Allocation and evaluation of regular components with non-multiplicity in the course of performing debugging work can improve the efficiency of their conduct and obtain an additional criterion for the technical diagnosis of equipment.

The features of the use of synchronous-comb filter as part of digital signal processors are considered. The proposed method allows the selection of regular components with non-integer multiplicity of the frequency of rotation of the rotor. The parallel structure used simplifies the formation of a common frequency response.

The results obtained during the work have practical value for analyzing the processes occurring in the equipment.

Keywords: vibration, diagnostics, synchronously-comb filter, filter with multiple bandwidths.

### Постановка проблеми

Одним з актуальних напрямків контролю технічного стану роторних машин (газотурбінних двигунів, компресорів, осьових компресорів, турбодетандерних агрегатів і ін.) є вібродіагностика. Вимірювання і аналіз віброакустичної активності роторних машин дозволяє визначити технічний стан як всього агрегату, так і окремих його вузлів. З цієї причини обов'язковою складовою автоматизованих систем технічної діагностики роторних машин є аналіз віброакустичних сигналів.

Складові віброакустичної активності роторних машин являють собою складний набір компонент. Прийнята класифікація, як правило, визначає регулярні, нерегулярні і шумоподібні компоненти. Регулярні компоненти пов'язані з частотою обертання ротора - частота їх коливань кратна частоті обертання ротора.

Моделі діагностичних сигналів енергетичного обладнання в даний час розроблені переважно лише для повільнозмінних параметрів, наприклад, для ракетного двигуна вони описуються системою нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь з числом змінних більше сотні. Для швидкозмінних параметрів моделі створені лише для простого обладнання. Недоліки цих моделей полягають у тому, що вони описують поведінку самого об'єкта і не орієнтовані на співвіднесення поведінки об'єкта з даними його динамічної активності, які фіксуються діагностичною апаратурою.

Для складних систем, наприклад авіаційних і суднових двигунів, нафто- та газоперекачувальних агрегатів, моделі практично відсутні. Тому створення узагальнених моделей вимірюваних параметрів, що будуть враховувати можливість опису проявів динамічної активності, завжди актуально. Використовуючи отримані моделі, можна проводити оцінку властивостей вимірюваних сигналів для виявлення факту наявності джерела динамічної активності і можливого механізму її виникнення.

Рішення проблеми вбачається в реалізації двох підходів: тестування об'єкта зовнішнім або внутрішнім джерелом активності відомої природи і проведення імітаційного моделювання з метою виявлення залежностей між реакціями об'єкта контролю та математичної моделі на зміну режимних параметрів. Такий підхід передбачає досить тривалі експериментальні дослідження об'єкта. Обробка результатів експерименту дозволяє не тільки виявити причини несправностей, а й створювати на основі узагальнених моделей об'єкта діагностичні моделі, що дозволяють відслідковувати характер несправностей. Застосування моделей, що описують вимірювані параметри об'єкта - необхідна умова підвищення якості оцінки технічного стану об'єкта.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як правило, аналіз віброакустичної активності заснований на використанні перетворення Фур'є, але при роботі роторної машини на перехідних режимах такий підхід є некоректним через нестационарності аналізованого процесу [1-3]. Одним з рішень є застосування методів синхронної обробки даних, в яких вузлом, що виділяють регулярні компоненти, є синхронно-гребінчастий фільтр (СГФ) [4], амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) якого перебудовується і має смуги пропускання сигналу на частотах кратних частоті обертання ротора (незалежно від зміни частоти обертання ротора). Застосування СГФ можливо при наявності міток часу, пов'язаних з фазовим положенням ротора, що забезпечується застосуванням датчиків частоти обертання ротора імпульсного типу, які в даний час встановлені на більшості роторних машин. Наявні рішення СГФ виконують виділення тільки регулярних складових з цілою кратністю [4].

Структура СГФ, що виконує виділення гармонійних складових кратних частоті обертання ротора, має вигляд (рис. 1) [4]. Даний фільтр забезпечує виділення перших  $N/2$  гармонік роторної частоти, які є регуляторними компонентами, що мають цілий крок кратності, де -  $N$  кількість вибірок даних за оборот ротора.

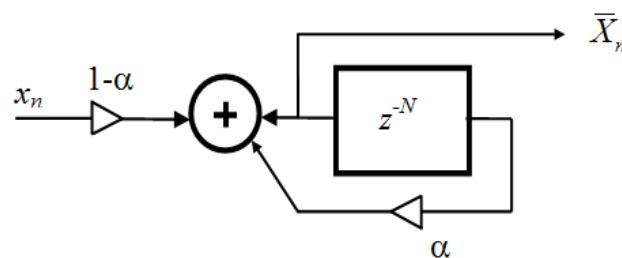


Рис. 1 - Структура СГФ



Передавальна функція СГФ має наступний вигляд:

$$H(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-N}}, \quad (1)$$

де  $z = e^{j\omega\Delta t}$  – затримка, що відповідає повороту ротора на кут  $\Delta\varphi = 360/N$  за час  $\Delta t$ ;

$N$  – кількість вибірок даних за оборот ротора;

$x_n$  – вхідний і вихідний звіт даних, що отримується в моменти кута положення ротора кратних

$\Delta\varphi = 360/N$ ;  $\bar{X}^n$  – вихідний звіт даних;

$\alpha$  – коефіцієнт який визначає параметри фільтрації, знаходиться в інтервалі від 0 до 1.

Структуру СГФ (рис. 1) можна перетворити в вигляді набору комутованих з частотою надходження міток часу, одиничних цифрових фільтрів (рис. 2).

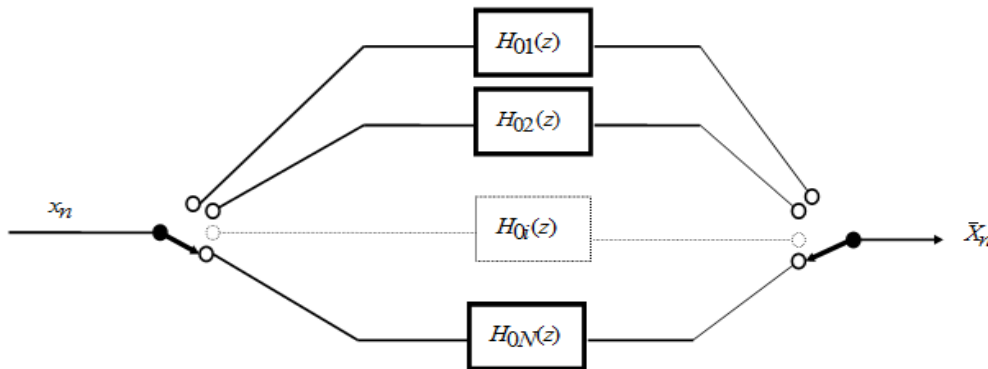


Рис. 2 - Структура керування одиничними фільтрами в складі СГФ

Для отримання передавальної функції СГФ (1) передавальна функція одиничного фільтра повинна мати такий вигляд:

$$H_0(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}. \quad (2)$$

В випадку побудови гребінчастого фільтра з довільною формою АЧХ на інтервалі його періодичного повторення, передавальна функція одиничного фільтра (2) і, відповідна їй, передавальна функція СГФ (1) буде мати вигляд [5,6]:

$$H_0(z) = \frac{\sum_{i=1}^M a_i * z^i}{1 - \sum_{l=1}^H b_l * z^l}, \quad (3)$$

$$H(z) = \frac{\sum_{i=1}^M a_i * z^{Ni}}{1 - \sum_{l=1}^H b_l * z^{Nl}}, \quad (4)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що визначають параметри дискретного (цифрового) фільтра;

$M$  і  $H$  – порядки фільтрів;

$N$  – кількість вибірок даних за оборот ротора.

Таким чином, для побудови СГФ, що виділяє регулярні компоненти з цілою і нецілою кратністю щодо частоти обертання ротора, необхідно синтезувати одиничний фільтр, АЧХ якого має кілька смуг пропускання.

#### Мета дослідження

Метою роботи є побудова синхронно-гребінчастого фільтру, здатного виділяти регулярні компоненти з цілою і нецілою кратністю щодо частоти обертання ротора і визначення особливостей синтезу СГФ для застосування в складі цифрових сигнальних процесорів (DSP).



Синтез цифрового фільтра за заданою АЧХ можливий для фільтра з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри). Для фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ-фільтри) наявні методи орієнтовані на синтез фільтра по заданому аналоговому, що пов'язано з необхідністю отримання коефіцієнтів передавальної функції наперед стійкого і реалізованого фільтра. Однак побудову фільтра тільки по заданій АЧХ можна замінити на формування заданої АЧХ шляхом об'єднання окремих фільтрів.

### Основні дослідження

В ході налагоджувальних випробувань роторної машини (турбодетандерного агрегату) на повітряному стенді в спектрі віброакустичної активності, вимірюваної безпосередньо на внутрішній опорі компресора, були виявлені регулярні складові, частоти яких мали не цілу кратність по відношенню до частоти обертання ротора. В ході проведення налагоджувальних робіт по механічному погодженню нерухомих і обертових частин роторної машини, при незмінній частоті обертання ротора, в спектрі сигналу вібрації фіксувалися регуляторні компоненти, що мали цілий крок кратності і крок з кратністю що закінчується на  $1/2$ ,  $1/4$  і  $1/8$ , щодо частоти обертання ротора, які зменшувалися у міру успішного виконання механічного узгодження, або залишалися незмінними при наявності механічних пошкоджень що розвивалися (рис. 3.).

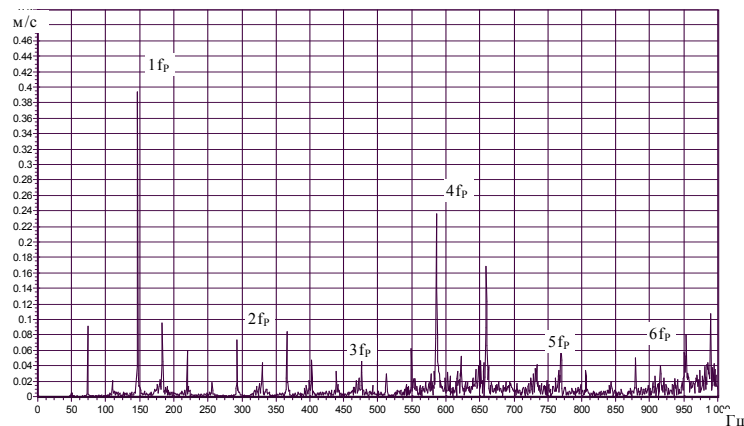


Рис. 3 - Спектр віброакустичної активності роторної машини при наявності регулярних компонент з кроком кратності  $1/2$  і  $1/4$ , де  $f_r$  - частота обертання ротора

Зазначене явище проявляється в разі істотного зносу обладнання і характеризується як критичний випадок при прояві регулярних компонент з кроком кратності  $1/2$ ,  $1/4$  і  $1/8$ ,  $1/3$  і  $2/3$  [1, 2]. Таким чином, виділення і оцінка регулярних компонент з нецілою кратністю в ході виконання налагоджувальних робіт дозволяє підвищити ефективність їх проведення і отримати додатковий критерій для виконання технічного діагностування обладнання.

Так як необхідна АЧХ одиничного фільтра повинна мати кілька смуг пропускання, то при паралельному з'єднанні фільтрів, кожний з яких забезпечує пропускання вхідного сигналу в своїй смузі пропускання, можливо побудувати одиничний фільтр без необхідності синтезу передавальної функції.

Одиничний фільтр зі смугами пропускання на частотах, які мають цілу кратність частоті обертання ротора і частотах, значення яких закінчуються на  $1/2$ ,  $1/4$  і  $1/8$ , повинен мати структуру, що складається з паралельного з'єднання (рис. 4):

- фільтра нижніх частот (ФНЧ), що виконує виділення регулярних складових, які мають цілу кратність по відношенню до частоти обертання ротора;
- фільтра верхніх частот (ФВЧ), що виконує виділення регулярних складових, які мають кратність з кроком  $1/2$  по відношенню до частоти обертання ротора;
- першого смугового фільтра (1СФ) налаштованого на частоту  $0,25$  частоти обертання ротора, що виконує виділення регулярних складових, які мають кратність з кроком  $1/4$  по відношенню до частоти обертання ротора;
- другого смугового фільтра (2СФ) налаштованого на частоту  $0,125$  частоти обертання ротора, що виконує виділення регулярних складових, які мають кратність з кроком  $1/8$  по відношенню до частоти обертання ротора;
- третього смугового фільтра (3СПФ) налаштованого на частоту  $0,375$  частоти обертання ротора, що виконує виділення регулярних складових, які мають кратність з кроком  $1/8$  по відношенню до частоти обертання ротора;

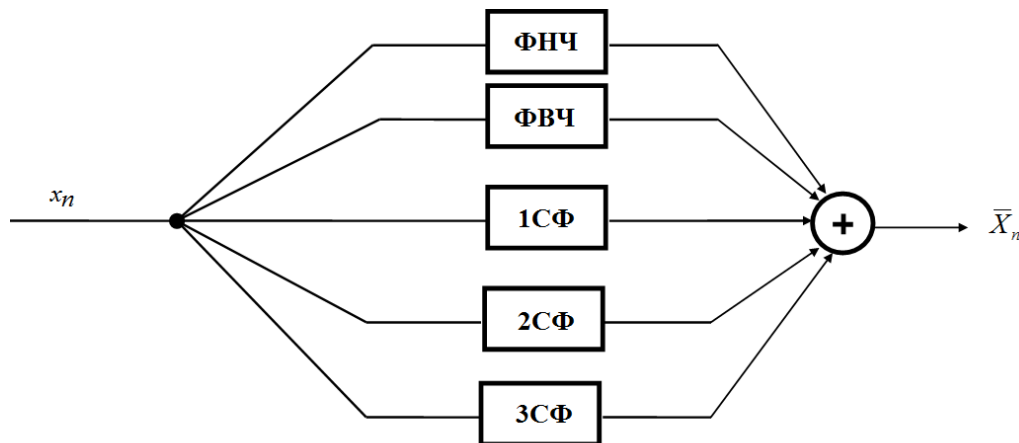


Рис. 4- Структура одиничного фільтра, що складається з паралельного з'єднання окремих фільтрів

Наведена структура одиничного фільтра (рис. 4) була синтезована з використанням пакета Matlab. Окремі фільтри виконувалися у вигляді еліптичних фільтрів шостого порядку зі смугами пропускання 1/200 щодо частоти обертання ротора, нерівномірністю в смугах пропускання 0,2 дБ і придушенням в смугах затримування не менше -110 дБ (рис. 5). Параметри обрані з умов можливості реалізації одиничного фільтра в складі DSP, обчислювальні операції в якому виконуються із застосуванням 32-розрядних чисел з плаваючою точкою, а також достатності вимкнення більш ніж на 90 дБ, так як динамічний діапазон 16 розрядного аналогово-цифрового перетворювача не перевищує 96 дБ.

Значення ширини смуги пропускання визначається очікуваною шириною спектра регулярних складових, які повинні бути виділені.

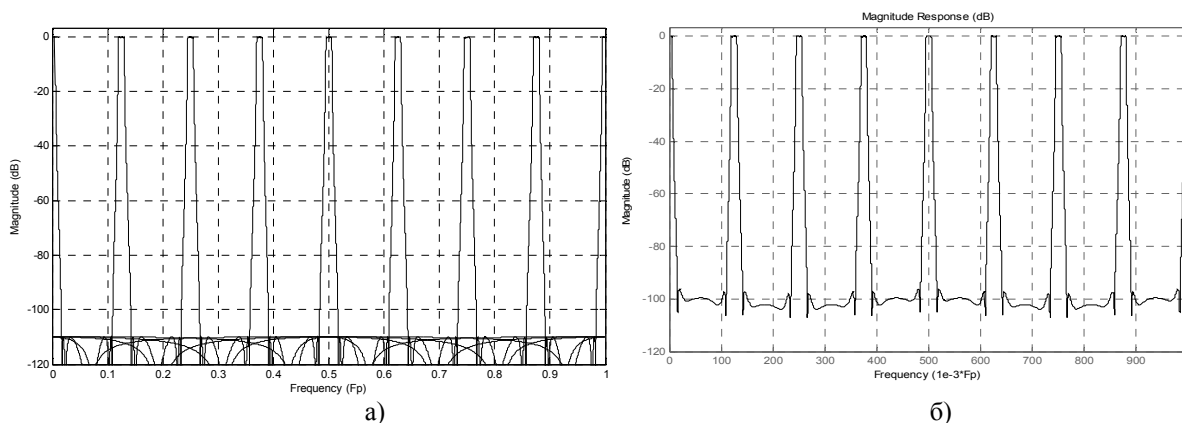


Рис. 5- АЧХ: а) ФНЧ, ФВЧ, 1СФ, 2СФ і 3СФ, б) одиничного фільтра, що складається з паралельного з'єднання окремих фільтрів. Інтервал відображення АЧХ від 0 до значення частоти обертання ротора ( $F_p$ ).

ФНЧ, виділяючи гармоніки роторної частоти мають цілу кратність, при порядку фільтра більше одиниці дозволяє отримати АЧХ що має форму близьку до прямокутної в смузі пропускання і більше загасання сигналу в смузі затримування в порівнянні з фільтром у вигляді інтегруючого ланки. Необхідно відзначити, що ФНЧ і ФВЧ в складі СГФ безпосередньо визначають параметри СГФ в діапазонах відповідних гармонікам частоти обертання ротора, що мають цілу і половинну кратність. У той же час СФ визначає відразу два діапазони, центральні частоти яких залежать від точності завдання коефіцієнтів СФ.

### Висновки

Моделювання роботи одиничного фільтра було виконано на комп'ютері загального призначення, з використанням бібліотеки Signal Processing Library v.4.5 фірми Intel, і в DSP ADSP-21061 фірми Analog Device, з використанням бібліотеки обробки сигналів для даного DSP. Моделювання виконувалося із застосуванням 32-розрядних чисел при обробці даних. В результаті моделювання було встановлено:

- завдання відносної смуги пропускання менше 1/1000 на комп'ютері загального призначення і 1/2000 в DSP фірми Analog Device, призводить до самозбудження фільтрів;
- величина рівнів вихідних сигналів розрізняються при виконанні моделювання на комп'ютері загального призначення і в DSP фірми Analog Device на 2,5..4,5%;
- рівень придушення сигналу поза смугою пропускання понад 80 дБ (в DSP фірми Analog Device);
- рівень шумів обчислень на 15 дБ менше при виконанні моделювання в DSP фірми Analog Device, ніж на комп'ютері загального призначення/

Відмінності пов'язані з тим, що в DSP фірми Analog Device реєстри акумулятора і арифметичні операції використовують 48-розрядного числа з плаваючою крапкою.

Запропонований метод побудови СГФ дозволяє виконувати виділення регулярних компонент з нецілою кратністю щодо частоти обертання ротора. Застосована паралельна структура з індивідуальних фільтрів, так як смуги пропускання не перекриваються, спрощує формування загальної АЧХ. Визначено динамічний діапазон вихідного сигналу і вплив особливостей умов обчислень в складі DSP. Отримані в ході роботи результати мають практичну цінність для аналізу процесів, що відбуваються в обладнанні. Уточнення методів побудови і аналізу математичних моделей дозволяє отримати достовірну інформацію про технічний стан обладнання.

#### Список використаної літератури

1. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. Изд 2-е. испр. М.: Машиностроение, 2000. 344 с.
2. Костюков В. Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: Изд-во Омуту, 2002. 108 с.
3. Robert B. R. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 289 p.
4. Емельянов С. В., Дмитриев Э. А. Измеритель параметров роторных машин. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, Одеса, 2000. N5-6. С. 48-49.
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. / СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
6. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Изд 2-е. испр. Москва: Техносфера, 2012. 1048 с.

#### References

1. Holdyn A. S. Vybratsyia rotornykh mashyn. Yzd 2-e. yspr. M.: Mashynostroenye, 2000. 344 с.
2. Kostiukov V. N., Naumenko A.P. Praktycheskye osnovy vybroakustycheskoi dyahnostyky mashynnoho oborudovanyia. Omsk: Yzd-vo Omutu, 2002. 108 s.
3. Robert B. R. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 289 p.
4. Emelianov S. V., Dmytryev E. A. Yzmeritel parametrov rotornykh mashyn. *Tekhnolohyia y konstruyrovanye v elektronnoi apparature*, Odesa, 2000. N5-6. S. 48-49.
5. Serhyenko A. B. Tsyfrovaia obrabotka syhnalov: ucheb. posobyе. / SPB.: BKhV-Peterburh, 2011. 768 s.
6. Oppenheim A., Shafer R. Tsyfrovaia obrabotka syhnalov. Yzd 2-e. yspr. Moskva: Tekhnosfera, 2012. 1048 s.

УДК 539.3

М.І. КЛИМЕНКО, С.І. ГОМЕНЮК, С.М. ГРЕБЕНЮК, О.В. КУДІН  
Запорізький національний університет**ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
В'ЯЗКОПРУЖНОГО ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО ВОЛОКНИСТОГО  
КОМПОЗИТУ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ЗСУВІ**

Пропонується методика визначення ефективного операторного модуля поздовжнього зсуву для односпрямованого волокнистого композиту. Складовими композиту є трансверсально-ізотропна в'язкопружна матриця та трансверсально-ізотропне в'язкопружне волокно. Їх площини ізоотропії збігаються та перпендикулярні осі волокна. В'язкопружні властивості матриці описуються ядром релаксації абелевого типу. Гомогенізація здійснюється для комірки композиту, що знаходиться в умовах чистого поздовжнього зсуву. При цьому розв'язуються дві крайові задачі: про поздовжній зсув трансверсально-ізотропного суцільного циліндра, що моделює волокнистий композит, та про сумісний поперечний зсув порожнинного та суцільного циліндрів, що моделюють відповідно матрицю та волокно. Запропонована методика ґрунтується на застосуванні кінематичної умови узгодженості осевих переміщень на поверхні комірки композиту, отриманих у результаті розв'язання цих задач. Розглянуто приклад визначення ефективного операторного модуля поздовжнього зсуву. Отриману ефективну операторну характеристику можна використати при визначенні напружено-деформованого стану елементів конструкцій, виготовлених з в'язкопружних композитів.

Ключові слова: композиційний матеріал, матриця, волокно, поздовжній зсув, в'язкопружність, трансверсально-ізотропний матеріал, інтегральний оператор, переміщення, напруження.

М.И. КЛИМЕНКО, С.И. ГОМЕНИУК, С.Н. ГРЕБЕНИУК, А.В. КУДИН  
Запорожский национальный университет**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВЯЗКОУПРУГОГО ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА  
ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СДВИГЕ**

Предлагается методика определения эффективного операторного модуля продольного сдвига для однонаправленного волокнистого композита. Составляющие композита – трансверсально-изотропная вязкоупругая матрица и трансверсально-изотропное упругое волокно. Их плоскости изотропии совпадают и перпендикулярны оси волокна. Вязкоупругие свойства матрицы описываются ядром релаксации абелева типа. Гомогенизация проводится для ячейки композита, находящейся в условиях чистого продольного сдвига. При этом решаются две краевые задачи: о продольном сдвиге трансверсально-изотропного сплошного цилиндра, моделирующего волокнистый композит, и о совместном поперечном сдвиге полого и сплошного цилиндра, моделирующих соответственно материалы матрицы и волокна. Предложенная методика основана на применении кинематического условия согласования осевых перемещений на поверхности ячейки композита, полученных в результате решения этих задач. Рассмотрен пример определения эффективного операторного модуля продольного сдвига. Полученную эффективную операторную характеристику можно использовать при определении напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, изготовленных из вязкоупругих композитов.

Ключевые слова: композиционный материал, матрица, волокно, продольный сдвиг, вязкоупругость, трансверсально-изотропный материал, интегральный оператор, перемещения, напряжения.

М.І. КЛЫМЕНКО, С.І. ГОМЕНИУК, С.М. ГРЕБЕНИУК, О.В. КУДИН  
Zaporizhzhya National University**THE DETERMINING OF A VISCOELASTIC TRANSTROPIC FIBER COMPOSITE EFFECTIVE  
CHARACTERISTICS UNDER LONGITUDE SHEAR**

A method has been developed for determining the effective longitudinal shear modulus for a viscoelastic fiber composite with a transversely isotropic matrix and fiber. This characteristic depends on the mechanical characteristics of the matrix and the fiber and the volume fraction of each of them in the composite. A unidirectional composite material with a hexagonal fiber pattern is considered. The hexagonal cell of the

composite consists of a viscoelastic matrix and an elastic fiber. The core of matrix relaxation is the Abel's core. The isotropy planes of the matrix and the fiber coincide and are perpendicular to the fiber axis. A geometric model of a composite is a combination of two coaxial infinite cylinders - a hollow one that models the matrix, and a continuous cylinder that is inserted into it that models the fiber. The volume of the hexagonal cell is approximated by the cylinder volume. In this case, the cylinder radius is chosen so that the volume fraction of the fiber in the hexagonal cell coincides with the volume fraction of the fiber for the cylindrical cell.

The Boltzmann-Volterra theory is used to describe the viscoelastic properties of a composite. The effective shear modulus of a composite is defined as an integral operator with a difference kernel. There are two axisymmetric boundary-value problems are considered: 1) the longitudinal shear of a transversely isotropic viscoelastic solid cylinder modeling the composite, and 2) the joint longitudinal shear of a hollow and solid cylinder that simulate a matrix material and a fiber material respectively. These problems are used to obtain effective characteristics of composite. The continuity of axial displacements and tangential stresses on the contact surface of the matrix and fiber is assumed. The tangential harmonic load is set on the outer surface of the cylindrical surface of the cell. The Laplace transform is used to solve these problems. The axial displacements of the matrix and the composite on the outer surface of the cylindrical cell are used as the kinematic condition.

The application of the proposed technique allowed to determine the characteristics of the integral operator. This operator defines the longitudinal shear modulus for a viscoelastic composite. The paper describes an example of the application of this method. The method allows to study the rheological properties of a viscoelastic composite. Different effective mechanical characteristics of the composite viscoelastic properties could be determined with various types of kinematic conditions.

*Key words: composite material, matrix, fiber, longitudinal shear, viscoelasticity, transtropic material, integral operator, displacement, stress.*

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Проблема гомогенізації в'язкопружних композитних матеріалів розглядається у багатьох наукових дослідженнях. Зокрема, у [1] розглянуто ефективні характеристики волокнистих, у тому числі й в'язкопружних композитів. Для визначення функції релаксації та функції повзучості розглянуто задачі про поздовжній розтяг односпрямованого волокнистого композиту. Ефективні характеристики в'язкопружних композитів застосовані для дослідження процесу розповсюдження у них хвиль. Розглянуто випадки ідеального та неідеального контактів між складовими композиту.

У [2] ефективні в'язкопружні характеристики композиту визначаються чисельно на основі застосування методу квазіконстантних операторів у поєднанні з методом скінченних елементів. Для цього на комірці періодичності композиту розв'язані відповідні крайові задачі. У публікації [3] наведено розв'язок задачі визначення в'язкопружних характеристик композитів з використанням теорії спадкової в'язкопружності Больцмана-Вольтерра. Для цього застосовано метод операторних ланцюгових дробів. У статті [4], визначаються ефективні в'язкопружні характеристики волокнистого композиту для поперечного деформування. Тут запропоновано лінійну в'язкопружну модель поверхні поділу волокна та матриці. Гомогенізація для комірки періодичності здійснювалась методом скінченних елементів. У монографії [5] розглядаються методи моделювання різних типів деформування композитів, зокрема, розглянуто їх в'язкопружне деформування. У [6] висвітлюються особливості моделювання напружено-деформованого стану композитів, розглянуто також в'язкопружні композити.

Застосування кінематичних умов узгодження у комбінації з методом інтегральних перетворень використано для визначення ефективних характеристик в'язкопружних композитів у публікаціях [7, 8]. Тут розглядалися композити з в'язкопружною матрицею, релаксаційні властивості якої визначалися показниковим ядром релаксації. Таке ядро доцільно використовувати для великих значень часу  $t$  деформування матеріалу. При невеликих  $t$  процес деформування більш адекватно описується з допомогою інших типів ядер для операторних модулів. Прикладом такого ядра є ядро Абеля, що використовується для моделювання в'язкопружних властивостей матриці у даній роботі. Тут для гомогенізації в'язкопружного композита розвинуто підхід, використаний у [7, 8].

#### **Мета дослідження**

Метою даної роботи є визначення ефективного операторного модуля поздовжнього зсуву для в'язкопружного трансверсально-ізотропного волокнистого композиту.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Для в'язкопружного волокнистого композиту операторний модуль поздовжнього зсуву є інтегральним оператором, що має вигляд:

$$\bar{G}_{12}[y(t)] = G_{12} \left( y(t) - \int_0^t R(t-\tau)y(\tau)d\tau \right), \quad (1)$$

де  $R(t-\tau)$  – ядро релаксації,  $G_{12}$  – сталий миттєвий модуль зсуву,  $y(t)$  – функція, на яку діє інтегральний оператор  $\bar{G}_{12}$

Розглянемо композитний матеріал періодичної структури з коміркою періодичності, що містить трансверсально-ізотропні складові – пружне волокно та в'язкопружну матрицю. Орієнтація волокон у композиті є однаковою. Площини ізоотропії матриці та волокна збігаються та перпендикулярні до осі волокна. Для отримання характеристик інтегрального оператора, що визначає шуканий ефективний модуль зсуву, розв'яжемо дві крайові задачі: про спільний поздовжній зсув порожнистого та суцільного циліндрів, що моделюють відповідно матрицю і волокно, та про поздовжній зсув трансверсально-ізотропного в'язкопружного суцільного циліндра, що моделює композит. У результаті розв'язання першої задачі отримуємо компоненти напружено-деформованого стану матриці та волокна у вигляді функцій пружних сталих складових композиту, а також об'ємної частки волокна у ньому. Для другої задачі отримуємо переміщення та напруження у однорідному композиті як функції ефективних характеристик цього матеріалу. У якості умови узгодження для цих двох задач використаємо рівність осьових переміщень матриці і композиту на зовнішній поверхні комірки.

Досліджується композит з гексагональним укладанням волокон. Елементарна гексагональна комірка апроксимується комбінацією двох коаксіальних нескінченних циліндрів - порожнистого із зовнішнім радіусом  $r=b$ , що моделює матрицю, і вставленого в нього суцільного циліндра з радіусом  $r=a$ , який моделює волокно. Відповідно об'єм гексагональної комірки апроксимуємо об'ємом циліндра, причому радіус циліндра приймемо таким, щоб об'ємна частка волокна  $f = a^2/b^2$  в гексагональній комірці збігалася зі значенням цього показника для циліндричної комірки.

Чистий поздовжній зсув у циліндричній області має місце, якщо на її зовнішню поверхню діє навантаження

$$\tau_{zr}(b, \theta) = \sigma_0 \cos \theta \quad (2)$$

У цьому випадку напруження та деформації у цій області мають вигляд:

$$\sigma_z = \sigma_r = \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0, \quad \tau_{zr} = \tau_{zr}(r, \theta), \quad \tau_{\theta z} = \tau_{\theta z}(r, \theta),$$

$$\gamma_{zr} = \gamma_{zr}(r, \theta), \quad \gamma_{\theta z} = \gamma_{\theta z}(r, \theta), \quad \varepsilon_z = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \gamma_{r\theta} = 0.$$

Компоненти напружень та деформацій при цьому набувають вигляду [7]:

$$u_z(r, \theta) = \left( C_1 r + \frac{C_2}{r} \right) \cos \theta, \quad (3)$$

$$\gamma_{z\theta}(r, \theta) = - \left( C_1 + \frac{C_2}{r^2} \right) \sin \theta, \quad (4)$$

$$\gamma_{zr}(r, \theta) = \left( C_1 - \frac{C_2}{r^2} \right) \cos \theta, \quad (5)$$

$$\tau_{zr}(r, \theta) = G_{12} \left( C_1 - \frac{C_2}{r^2} \right) \cos \theta, \quad (6)$$

$$\tau_{z\theta}(r, \theta) = -G_{12} \left( C_1 + \frac{C_2}{r^2} \right) \sin \theta. \quad (7)$$

Розглянемо задачу про узгоджений поздовжній зсув матриці та волокна, вважаючи, що матриця є в'язкопружною. У цьому випадку переміщення, напруження та деформації точок матриці (3) – (7) є функціями часу.

В'язкопружні властивості матриці визначаються з допомогою інтегрального оператора зсуву  $\bar{G}_{12}^*$ . Він має вигляд:

$$\bar{G}_{12}^*[y(t)] = G_{12}^* \left( y(t) - \int_0^t R^*(t-\tau)y(\tau)d\tau \right). \quad (8)$$

Тут  $G_{12}^*$  – миттєвий модуль зсуву матриці. Він відповідає початку процесу деформування композиту  $t=0$ ,  $R^*(t)$  – ядро релаксації матриці.



Переміщення, напруження та деформації волокна набувають вигляду, аналогічного (3) – (7) і теж є функціями часу. Враховуючи обмеженість переміщень у комірці композиту, зокрема, при  $r = 0$ , коефіцієнти при від'ємних степенях  $r$  дорівнюють нулю.

Використання крайової умови (2) та умов неперервності осевих переміщень  $u_z$  та дотичних напружень  $\tau_{zr}$  при  $r = a$  дозволяє отримати зображення переміщень та напружень точок матриці та волокна, куди входить зображення операторного модуля зсуву для матриці.

Розв'язок аналогічної задачі про чистий поздовжній зсув отримано для однорідного трансверсально-ізотропного в'язкопружного матеріалу, що моделює композит. Зображення компонентів його напружено-деформованого стану при перетворенні Лапласа містять зображення ефективного операторного модуля поздовжнього зсуву.

Записавши кінематичну умову узгодження для обох розглянутих задач

$$u_z(b, \theta) = u_z^*(b, \theta). \quad (9)$$

у зображеннях, отримаємо: рівність

$$G_{12}(1 - \tilde{R}(p)) = \frac{G_{12}^*(1 - \tilde{R}^*(p))(G_{12}^\circ(1 + f) + G_{12}^*(1 - f)(1 - \tilde{R}^*(p)))}{(1 - f)G_{12}^\circ + (1 + f)G_{12}^*(1 - \tilde{R}^*(p))}. \quad (10)$$

Тут  $G_{12}$  – ефективний миттєвий модуль зсуву,  $\tilde{R}^*(p)$  – зображення ядра релаксації,  $G_{12}^\circ$  – модуль зсуву волокна.

Переходячи у рівності (10) до границі при  $p \rightarrow \infty$  та враховуючи, що  $\lim_{p \rightarrow \infty} R(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} R^*(p) = 0$ , отримаємо формулу для визначення миттєвого модуля зсуву:

$$G_{12} = \frac{G_{12}^*(G_{12}^\circ(1 + f) + G_{12}^*(1 - f))}{(1 - f)G_{12}^\circ + (1 + f)G_{12}^*}. \quad (11)$$

Знайдемо ядро інтегрального оператора  $R(t)$ . Для цього з рівності (10) знайдемо зображення  $\tilde{R}(p)$ . Позначивши  $1 - \tilde{R}^*(p) = x(p) = x$ , отримаємо:

$$\tilde{R}(p) = \frac{k_1 x^2 + k_2 x + k_3}{x + k_3}, \quad (12)$$

$$\text{тут } k_1 = \frac{-(1-f)^2 G_{12}^\circ - (1-f^2) G_{12}^*}{(1+f)^2 G_{12}^\circ + (1-f^2) G_{12}^*}, \quad k_2 = \frac{(1-f)((G_{12}^*)^2 - (G_{12}^\circ)^2)}{G_{12}^*((1+f)G_{12}^\circ + (1-f)G_{12}^*)}, \quad k_3 = \frac{(1-f)G_{12}^\circ}{(1+f)G_{12}^*}.$$

Як приклад застосування викладеної методики моделювання модуля зсуву композиційного матеріалу побудуємо інтегральний оператор  $\bar{G}_{12}$  для випадку, коли матеріал матриці – це гума марки 67Л, для якої  $G_{12}^* = 1,5$  МПа, матеріал волокна – поліамідний корд КНТС, для якого  $G_{12}^\circ = 4,9$  МПа.

Значення миттєвого модуля зсуву  $G_{12}$ , розраховані за формулою (11) для різних значень об'ємної частки волокна у композиті  $f$  представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення миттєвого модуля зсуву  $G_{12}$  при різних значеннях відносної об'ємної частки волокна у композиті  $f$

|          |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f$      | 0,0   | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1,0   |
| $G_{12}$ | 1,500 | 1,857 | 2,310 | 2,904 | 3,717 | 4,900 |

Зазначимо, що знайдені значення  $G_{12}$  збігаються з аналогічними значеннями для композита, матриця якого має експоненційне ядро, отриманими у роботі [7].

Нехай в'язкопружні властивості матриці композиту описуються інтегральним оператором з ядром Абеля  $R^*(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}}$ . Тоді  $\tilde{R}^*(p) = \frac{1}{\sqrt{p}}$ ,  $x = \frac{\sqrt{p}-1}{\sqrt{p}}$ . Зображення ядра (12) набуває вигляду:

$$\tilde{R}(p) = \frac{k_1 k_3 - k_1 - k_2}{1 + k_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{p} - \frac{1}{1 + k_3}} - \frac{k_1}{\sqrt{p}}. \quad (13)$$

Оригінал  $R(t)$  знаходимо з допомогою таблиць перетворення Лапласа та властивостей цього перетворення. Повертаючись до вихідних параметрів задачі, знайдений оригінал ядра запишемо у вигляді:

$$R(t) = \frac{4f(1-f)}{1+f} \cdot \frac{(G_{12}^{\circ})^2}{(1-f^2)((G_{12}^{\circ})^2 + (G_{12}^*)^2) + 2(1+f^2)G_{12}^*G_{12}^{\circ}} \times \\ \times \left( \frac{1}{\sqrt{\pi t}} + \alpha e^{\alpha^2 t} (1 - \operatorname{erf}(\alpha \sqrt{t})) \right) + \frac{1-f}{1+f} \cdot \frac{(1-f)G_{12}^{\circ} + (1+f)G_{12}^*}{(1-f)G_{12}^* + (1+f)G_{12}^{\circ}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad (14)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{(1+f)G_{12}^*}{(1+f)G_{12}^* + (1-f)G_{12}^{\circ}}, \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

На рис. 1 наведено графіки ядра релаксації (14) для значень частки волокна у композиті  $f = 0,1$  (крива 1),  $f = 0,3$  (крива 2),  $f = 0,5$  (крива 3),  $f = 0,7$  (крива 4). Зі зростанням значення  $f$ , тобто збільшенням частки пружного волокна у композиті в'язкопружні властивості композита зменшуються і криві  $R(t)$  при фіксованих  $t$  наближаються до осі абсцис.

Ядро релаксації при довільних значеннях  $f$  являє собою монотонно спадну функцію, що набуває невід'ємних значень. Слабка (інтегровна) особливість у точці  $t = 0$  пояснюється наявністю такої ж особливості у абелевому ядрі релаксації в'язкопружної матриці.

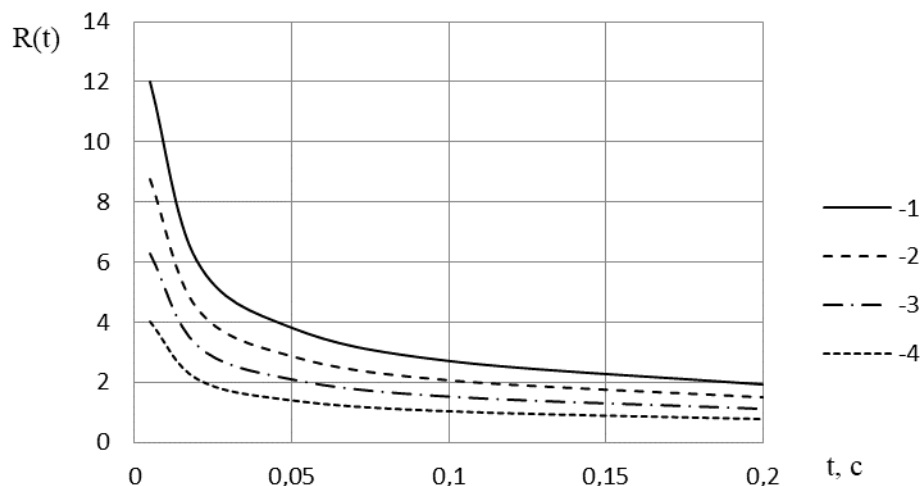


Рисунок 1 – Залежності ядра релаксації  $R(t)$  ефективного операторного модуля поздовжнього зсуву в'язкопружного композита від часу  $t$  для різних значень частки  $f$  волокна у композиті ( $f=0,1$  – крива 1,  $f=0,3$  – крива 2,  $f=0,5$  – крива 3,  $f=0,7$  – крива 4)

Отже, знайдено ядро релаксації для ефективного операторного модуля зсуву  $\bar{G}_{12}$  для композита. Запропоновану методику визначення ефективних операторних модулів, що ґрунтується на застосуванні кінематичних умов узгодження вибраних переміщень точок матриці, волокна та однорідного композиту, можна застосувати також для визначення інших ефективних характеристик в'язкопружного композиту. При цьому можна досліджувати композити зі складовими, в'язкопружні характеристики яких моделюються ядрами релаксації, відмінними від абелевих. Вибір ядра залежить від в'язкопружних властивостей матеріалу, що визначаються експериментальним шляхом. Для більшості ядер релаксації, що на практиці використовують для описання в'язкопружних властивостей складових композита, отримуємо зображення ядра релаксації для ефективного модуля зсуву, яке допускає аналітичне обернення перетворення Лапласа.

### Висновки

Таким чином, розв'язання задачі знаходження модуля зсуву для композиту з в'язкопружною матрицею можна отримати шляхом узгодження розв'язків двох крайових задач: задачі про поздовжній зсув трансверсально-ізотропного в'язкопружного однорідного циліндра, що моделює композит, та задачі про спільний зсув порожнистого та суцільного циліндрів, що моделюють відповідно матрицю і волокно. Для їх розв'язання можна використати інтегральне перетворення Лапласа. Це дає змогу знайти значення миттєвого модуля та ядро релаксації операторного модуля поздовжнього зсуву. Запропонований підхід можна використати для знаходження системи ефективних операторних показників що повністю визначають напружено-деформований стан в'язкопружного композиту.

### Список використаної літератури

1. Большаков В. И., Андрианов И. В., Данишевский В. В. Асимптотические методы расчета композитных материалов с учетом внутренней структуры. Днепропетровск: «Пороги», 2008. 196 с.
2. Куимова Е.В., Труфанов Н.А. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами. *Вестник СамГУ. Естественная серия*. 2009. №4(70). С. 129 – 148.
3. Каминский А.А., Селиванов М.Ф. Об одном методе определения характеристик вязкоупругого деформирования композитов. *Прикладная механика*. 2005. Т.41, № 5. С. 9 – 21.
4. Gosz M., Moran B., Achenbach J.D. Effect of a viscoelastic interface on the transverse behavior of fiber-reinforced composites. *International Journal of Solids and Structures*. 1991. Vol. 27. P. 1757-1771.
5. [Aboudi J.](#), [Arnold S.M.](#), [Bednarczyk B.A.](#) Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. 1006 p.
6. Barbero E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials (Composite Materials: Design and Analysis). Boca Raton: CRC Press. 2007. 360 p.
7. Grebenyuk S., Klimenko M. Shear Modulus of a Fiber Composite with a Transtropik Viscoelastik Matrix and Transtropic Elastic Fiber. *Journal of Mechanical Engineering*. 2018. Vol.21, 3, P. 47–53.
8. Grebenyuk S., Klimenko M., Titova O., Smoliankova T. Characteristics of the Viscoelastic Fiber-reinforced Composite with Transversally Isotropic Components under Transverse Shear. *Mechanika 2018. Proceedings of the 23<sup>th</sup> international scientific conference*. Kaunas University of Technology, 18 May 2018. Lithuania. Kaunas. 2018. P. 31 – 35.

### References

1. Bolshakov V. I., Andrianov I. V., Danishevskiy V. V. Asimptoticheskie metodyi rascheta kompozitnykh materialov s uchetom vnutrenney strukturyi. Dnepropetrovsk: «Porogi», 2008. 196 s.
2. Kuimova E.V., Trufanov N.A. Chislennoe prognozirovanie effektivnykh termovyazkouprugikh harakteristik odnonapravlennoy voloknistogo kompozita s vyazkouprugimi komponentami // Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya. 2009. #4(70). S. 129 – 148.
3. Kaminskiy A.A., Selivanov M.F. Ob odnom metode opredeleniya harakteristik vyazkouprugogo deformirovaniya kompozitov // Prikladnaya mehanika. 2005. T.41, # 5. S. 9 – 21.
4. Gosz M., Moran B., Achenbach J.D. Effect of a viscoelastic interface on the transverse behavior of fiber-reinforced composites // International Journal of Solids and Structures. 1991. Vol. 27. P. 1757-1771.
5. Aboudi J., Arnold S.M., Bednarczyk B.A. Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. 1006 p.
6. Barbero E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials (Composite Materials: Design and Analysis) Boca Raton: CRC Press. 2007. 360 p.
7. Grebenyuk S., Klimenko M. Shear Modulus of a Fiber Composite with a Transtropik Viscoelastik Matrix and Transtropic Elastic Fiber // Journal of Mechanical Engineering. Vol.21, 3, 2018. – P. 47 – 53.
8. Grebenyuk S., Klimenko M., Titova O., Smoliankova T. Characteristics of the Viscoelastic Fiber-reinforced Composite with Transversally Isotropic Components under Transverse Shear. //Mechanika 2018. Proceedings of the 23th international scientific conference. Kaunas University of Technology, Lithuania. – Kaunas. – 2018. – P. 31 – 35.

УДК 519.24

М.Д. КОШОВИЙ, І.І. КОШОВА

Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ»

О.М. КОСТЕНКО

Полтавська державна аграрна академія

## ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

*Розглянуто побудову планів багатofакторних експериментів, що оптимальні за вартісними (часовими) витратами на їх реалізацію. Синтез таких планів виконується з використанням коду Грея. При цьому будувалися оптимальні плани для дослідження таких технологічних процесів, як нанесення гальванічних покриттів однакової товщини на друковані плати та процесу глибокого плазмохімічного травлення МЕМС. Доказана працездатність та ефективність методу оптимізації за вартістю (часом) реалізації планів багатofакторних експериментів, оснований на використанні коду Грея. Запропоновані методи побудови оптимальних планів багатofакторних експериментів на основі коду Грея можна ефективно використовувати при дослідженні різноманітних об'єктів, що дозволяють реалізацію на них активних експериментів.*

*Ключові слова:* план, експеримент, оптимізація, вартість, час реалізації, код Грея, технологічний процес.

Н.Д. КОШЕВОЙ, И.И. КОШЕВАЯ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Е.М. КОСТЕНКО

Полтавская государственная аграрная академия

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Рассмотрено построение планов многофакторных экспериментов, оптимальных по стоимостным (временным) затратам на их реализацию. Синтез таких планов выполняется с использованием кода Грея. При этом строятся оптимальные планы для исследования таких технологических процессов, как нанесение гальванических покрытий одинаковой толщины на печатные платы и процесса глубокого плазмохимического травления МЕМС. Доказана работоспособность и эффективность метода оптимизации по стоимости (времени) реализации планов многофакторных экспериментов, основанного на использовании кода Грея. Предложенные методы построения оптимальных планов многофакторных экспериментов на основе кода Грея можно эффективно использовать для исследования разнообразных объектов, которые позволяют реализацию на них активных экспериментов.*

*Ключевые слова:* план, эксперимент, оптимизация, стоимость, время реализации, код Грея, технологический процесс.

N.D. KOSHEVOY, I.I. KOSHEVAYA

The National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"

E.M. KOSTENKO

Poltava State Agrarian Academy

## OPTIMUM EXPERIMENTS PLANNING FOR RESEARCH IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

*The purpose of the article. The efficiency and effectiveness of optimization methods for the price (time) costs in multifactor experiment plans should be confirmed in a number of real technological processes by using the Gray code.*

*Method. The method, which is developed by the authors, based on the use of the Gray code is used for optimization plans of a full factorial experiment in price (time) costs.*

*Results. Optimal plans in price (time) cost for a full factorial experiment were developed for research in such technological processes as the deposition of electroplated coatings of the same thickness on printed circuit boards and the MEMS process of deep plasma etching.*

*Application area. The methods of constructing optimal plans for multifactor experiments in price (time) cost can be effectively used in the study of various objects which allow the realization of active experiments.*

**Conclusions.** The efficiency and effectiveness of the optimization method of plans for a full factorial experiment in price (time) costs, which based on the use of the Gray code, has been proved.

Plans for the full factorial experiment to study such technological processes as the deposition of electroplated coatings of the same thickness on printed circuit boards, studying the surface roughness of silicon in the MEMS plasma-chemical etching process were optimized in cost (time) expenses.

It was shown the profits in the cost of implementing the constructed experiment plan, compared to the original plan. For studying the process of applying electroplated coatings of the same thickness on printed circuit boards it increases in 3.26 times, and for studying the process of deep plasma-chemical etching MEMS is 1.28 times. Optimal time for implementation the experiment plan for studying the surface roughness of silicon in the MEMS deep plasma-chemical etching processes yields a gain of 1.36 times compared with the original plan.

Further studies will be aimed at assessing the efficiency and effectiveness of developed plans for a fractional factorial experiment and compositional plans for research technological processes.

Keywords: plan, experiment, optimization, cost, implementation time, Gray code, process.

### Постановка проблеми

Вирішення задач оптимізації та управління різноманітними об'єктами, як правило, потребує створення математичних моделей цих об'єктів. При цьому оправдано прагнення експериментаторів отримувати моделі при мінімальних вартісних (часових) витратах. Для рішення цих задач доцільно використовувати методи планування експериментів, перевагами яких являються їхня універсальність і придатність для використання в багатьох областях дослідження. Вартість реалізації експерименту суттєво залежить від порядку чергування дослідів в розробленому плані. Тому виникає проблема оптимізації планів експерименту за вартісними (часовими) витратами та його реалізацію.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вирішення цієї проблеми використовувалися наступні методи [1-12]: повний та обмежений перебір, випадковий пошук, метод гілок і меж, скупий алгоритм, імітування відпаду, генетичні алгоритми, симплекс-метод, алгоритм найближчого сусіда, табу-пошук, метод вкладених розбивок, рою часток, мурашиний та бджолиний алгоритми, пошук косяком риб, алгоритм стрибаючих жаб, мавпячий пошук. Кожний із наведених методів має свої переваги та недоліки. Основними недоліками є: низька бистрота, не завжди знаходиться оптимальне рішення, необхідність в розробці програмного забезпечення для їх реалізації. Порівняльний аналіз методів наведений в роботах [11,12]. З метою ліквідації цих недоліків були запропоновані методи оптимізації планів багатофакторних експериментів, основані на використанні кода Грея [13]. Деякі приклади, що доказують працездатність та ефективність цих методів, наведені в роботі [14].

### Мета дослідження

На ряді реальних технологічних процесів підтвердити працездатність та ефективність методів оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів, що використовують код Грея.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Перевірку працездатності та ефективності запропонованого методу синтезу оптимальних планів повного факторного експерименту, основаного на коді Грея [13], виконували на прикладі дослідження технологічного процесу нанесення гальванічних покриттів однакової товщини на друковані плати [1].

В роботі [1] приведено початковий план експерименту ( $k=4$ ) та вартості зміни значень рівнів факторів для дослідження цього технологічного процесу.

Використовуючи метод оптимізації [13], оснований на застосуванні кода Грея, отримано оптимальний план експерименту, наведений у табл. 1.

Таблиця 1

**Оптимальний план експерименту для дослідження технологічного процесу нанесення гальванічних покриттів однакової товщини на друковані плати ( $k=4$ )**

| №№<br>п/п | Позначення факторів      |       |       |       |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|
|           | $X_1$                    | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ |
|           | Нові позначення факторів |       |       |       |
|           | $X_3$                    | $X_4$ | $X_2$ | $X_1$ |
| 1         | -1                       | -1    | -1    | -1    |
| 2         | +1                       | -1    | -1    | -1    |
| 3         | +1                       | +1    | -1    | -1    |

Продовження табл. 1

| №№<br>п/п | Позначення факторів      |                |                |                |
|-----------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
|           | X <sub>1</sub>           | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> |
|           | Нові позначення факторів |                |                |                |
|           | X <sub>3</sub>           | X <sub>4</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>1</sub> |
| 4         | -1                       | +1             | -1             | -1             |
| 5         | -1                       | +1             | +1             | -1             |
| 6         | +1                       | +1             | +1             | -1             |
| 7         | +1                       | -1             | +1             | -1             |
| 8         | -1                       | -1             | +1             | -1             |
| 9         | -1                       | -1             | +1             | +1             |
| 10        | +1                       | -1             | +1             | +1             |
| 11        | +1                       | +1             | +1             | +1             |
| 12        | -1                       | +1             | +1             | +1             |
| 13        | -1                       | +1             | -1             | +1             |
| 14        | +1                       | +1             | -1             | +1             |
| 15        | +1                       | -1             | -1             | +1             |
| 16        | -1                       | -1             | -1             | +1             |

Результати порівняння за вартістю і виграші при реалізації планів експерименту, отриманих різними методами, наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Вартості і виграші при реалізації оптимальних планів експерименту**

| Метод             | Вартість, ум. од. | Виграш, разів |
|-------------------|-------------------|---------------|
| Начальний план    | 142,12            | –             |
| Обмежений перебір | 79,46             | 1,8           |
| Код Грея          | 43,66             | 3,26          |

В роботі [1] наведено початковий план експерименту та вартості зміни значень рівнів факторів і час зміни цих значень при дослідженні шорсткості поверхні кремнія у процесах глибокого плазмохімічного травлення MEMC.

Оптимальні за вартісними і часовими витратами плани експериментів, отримані методом, оснований на застосуванні кода Грея, наведені у табл. 3.

Таблиця 3

**Оптимальні за вартісними і часовими витратами плани експериментів**

| Оптимальний за вартісними витратами |                          |                |                | Оптимальний за часовими витратами |                          |                |                |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|
| №<br>п/п                            | Позначення факторів      |                |                | №<br>п/п                          | Позначення факторів      |                |                |
|                                     | X <sub>1</sub>           | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |                                   | X <sub>1</sub>           | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |
|                                     | Нові позначення факторів |                |                |                                   | Нові позначення факторів |                |                |
|                                     | X <sub>1</sub>           | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |                                   | X <sub>2</sub>           | X <sub>1</sub> | X <sub>3</sub> |
| 1                                   | -1                       | -1             | -1             | 1                                 | -1                       | -1             | -1             |
| 2                                   | +1                       | -1             | -1             | 2                                 | +1                       | -1             | -1             |
| 3                                   | +1                       | +1             | -1             | 3                                 | +1                       | +1             | -1             |
| 4                                   | -1                       | +1             | -1             | 4                                 | -1                       | +1             | -1             |
| 5                                   | -1                       | +1             | +1             | 5                                 | -1                       | +1             | +1             |
| 6                                   | +1                       | +1             | +1             | 6                                 | +1                       | +1             | +1             |
| 7                                   | +1                       | -1             | +1             | 7                                 | +1                       | -1             | +1             |
| 8                                   | -1                       | -1             | +1             | 8                                 | -1                       | -1             | +1             |

Вартісні (часові) витрати та виграші на реалізацію планів експериментів наведені у табл. 4



Таблиця 4

**Вартісні (часові) виграші при реалізації експериментів**

| Метод             | Вартість,<br>ум. од. | Час,<br>хв. | Виграш у вартості,<br>разів | Виграш у часу,<br>разів |
|-------------------|----------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|
| Начальний план    | 124                  | 178         | –                           | –                       |
| Метод гілок і меж | 97                   | 137         | 1,28                        | 1,3                     |
| Код Грея          | 97                   | 131         | 1,28                        | 1,36                    |

**Висновки**

1. Показана працездатність та ефективність методу оптимізації планів багатофакторних експериментів, оснований на застосуванні кода Грея.

2. Оптимізовані за вартісними (часовими) витратами плани повного факторного експерименту для дослідження таких технологічних процесів, як процеси нанесення гальванічних покриттів однакової товщини на друковані плати, дослідження шорсткості поверхні кремнія у процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС.

3. Показано, що виграші, у порівнянні з начальними планами, по вартості реалізації отриманих планів експерименту для дослідження перерахованих об'єктів знаходяться в межах від 1,28 до 3,26 разів, а в часі реалізації – в 1,36 раза при дослідженні шорсткості поверхні кремнія у процесах глибокого плазмохімічного травлення МЕМС.

4. Подальші дослідження будуть направлені на оцінку працездатності та ефективності побудови на основі кода Грея планів дробного факторного експерименту і композиційних планів.

**Список використаної літератури**

1. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Павлик А.В., Доценко Н.В. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента: монография. Полтава: ПГАА, 2017. 232 с.
2. Koshevoy N.D., Gordienko V.A., Sukhobrus Ye.A. Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes. Telecommunication and radio engineering. 2014. Vol.73. P. 1383-1386.
3. Кошевой Н.Д., Чистикова З.Э., Бельмега А.В. Оптимизация многофакторных планов эксперимента с применением алгоритмов имитации отжига и ближайшего соседа. East European Scientific Journal. 2016. Vol. 2. No 2(6). P. 115-118.
4. Кошевой Н.Д., Рожнова В.А., Рожнова Т.Г. Особенности применения муравьиного алгоритма для оптимизации по стоимости многофакторных планов эксперимента : PROCEEDINGS. 26 th National scientific symposium with international participation, Sozopol, Bulgaria, September 7-11. 2016. P. 338-341.
5. Кошевой Н.Д., Бельмега А.В., Кошечая И.И. Оптимизация композиционных планов второго порядка с использованием жадного алгоритма и алгоритма имитации отжига: Proceedings of the III international scientific and practical conference «Topical Problems of Modern science and Possible Solutions (September 28-29, 2016, Dubai UAE)». International and scientific and practical conference «WORLD SCIENCE». October 2016. Vol. 1. No 10(14). P. 11-16.
6. Кошовий М.Д., Стадник А.С. Оптиміальне планування експерименту на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Київ, 2017. №58. С. 19-24.
7. Кошевой Н.Д., Беляева А.А. Применение алгоритма оптимизации роом частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента. Радиоэлектроника, информатика, управление. 2018. №1. С. 41-49.
8. Koshevoy N.D., Belyaeva A.A., Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions: 28<sup>th</sup> international scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2018". Proceedings of the symposium, September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria, С. 327-330.
9. Кошовий М.Д., Муратов В.В. Застосування алгоритму мавпячого пошуку для оптимізації планів повного факторного експерименту. Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. 2018. №61. С. 61-69.
10. Кошевой Н.Д., Муратов В.В. Применение алгоритма прыгающих лягушек для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов многофакторного эксперимента. Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2018. №4. С. 53-60.
11. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Беляева А.А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Радиоэлектроника, информатика, управление. 2018. №4. С. 179-187.
12. Кошовий М.Д., Кошова І.І., Костенко О.М. Методи оптимізації по вартісним (часовим) витратам

- планів багатфакторних експериментів: тези доп. VI Міжнар. наук. техн. конф. «Датчики, прилади та системи - 2017», присвяченої пам'яті В.М. Шарапова (м. Черкаси, вересень, 2016 р.). Черкаси, 2017. С. 13-14.
13. Кошевой Н.Д., Кошечая И.И., Раскин Л.Г. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов полного факторного эксперимента. Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2016. №2. С. 46-50.
  14. Кошевой Н.Д., Кошечая И.И., Костенко Е.М. Применение методов оптимизации, основанных на коде Грея, при исследовании технологических процессов и приборов. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2018. Том 2. №3 (66). С. 241-245.

#### Transliteratsiia

1. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Pavlik A.V., Dotsenko N.V. Metodologiya optimalnogo po stoimostnyim i vremennym zatratam planirovaniya eksperimenta: monografiya. Poltava: PGAA, 2017. 232 s.
2. Koshevoy N.D., Gordienko V.A., Sukhobrus Ye.A. Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes. Telecommunication and radio engineering. 2014. Vol.73. P. 1383-1386.
3. Koshevoy N.D., Chistikova Z.E., Belmega A.V. Optimizatsiya mnogofaktornykh planov eksperimenta s primeneniem algoritmov imitatsii otzhiga i blizhayshego soseda. East European Scientific Journal. 2016. Vol. 2. No 2(6). P. 115-118.
4. Koshevoy N.D., Rozhnova V.A., Rozhnova T.G. Osobennosti primeneniya muravinogo algoritma dlya optimizatsii po stoimosti mnogofaktornykh planov eksperimenta : PROCEEDINGS. 26 th National scientific symposium with international participation, Sozopol, Bulgaria, September 7-11. 2016. P. 338-341.
5. Koshevoy N.D., Belmega A.V., Koshevaya I.I. Optimizatsiya kompozitsionnykh planov vtorogo poryadka s ispolzovaniem zhadnogo algoritma i algoritma imitatsii otzhiga: Proceedings of the Sh international scientific and practical conference «Topical Problems of Modern science and Possible Solutions (September 28-29, 2016, Dubai UAE». International and scientific and practical conference «WORLD SCIENCE». October 2016. Vol. 1. No 10(14). P. 11-16.
6. Koshovyi M.D., Stadnyk A.S. Optymalne planuvannya eksperymentu na osnovi alhorytmu shtuchnykh bdzholynykh kolonii. Zbirnyk naukovykh prats viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. Tarasa Shevchenka. Kyiv, 2017. №58. S. 19-24.
7. Koshevoy N.D., Belyaeva A.A. Primenenie algoritma optimizatsii roem chastits dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta. Radioelektronika, informatika, upravlenie. 2018. #1. S. 41-49.
8. Koshevoy N.D., Belyaeva A.A., Rozhnova T.G. Optimal planning methods for measurements in limited material resources conditions: 28<sup>th</sup> international scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2018". Proceedings of the symposium, September 10-14, 2018, Sozopol, Bulgaria, C. 327-330.
9. Koshovyi M.D., Muratov V.V. Zastosuvannya alhorytmu mavpiachoho poshuku dlia optymizatsii planiv povnoho faktornoho eksperymentu. Zbirnyk naukovykh prats viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. Tarasa Shevchenka. 2018. №61. S.61-69.
10. Koshevoy N.D., Muratov V.V. Primenenie algoritma pryigayuschiy lyagushek dlya optimizatsii po stoimostnyim (vremennym) zatratam planov mnogofaktornogo eksperimenta. Radioelektronnyie i kompyuternyye sistemyi. 2018. #4. S. 53-60.
11. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Belyaeva A.A. Sravnitelnyiy analiz metodov optimizatsii pri issledovanii vesoizmeritelnoy sistemyi i termoregulyatora. Radioelektronika, informatika, upravlenie. 2018. #4. S. 179-187.
12. Koshovyi M.D., Koshova I.I., Kostenko O.M. Metody optymizatsii po vartisnym (chasovym) vytratam planiv bahatofaktornykh eksperymentiv: tezy dop. VI Mizhnar. nauk. tekhn. konf. «Datchyky, prylady ta systemy - 2017», prysviachenoi pamiati V.M. Sharapova (m. Cherkasy, veresen, 2016 r.). Cherkasy, 2017. S. 13-14.
13. Koshevoy N.D., Koshevaya I.I., Raskin L.G. Sintez optimalnykh po stoimostnyim ili vremennym zatratam planov polnogo faktornogo eksperimenta. RadIoelektronni I komp'yuterni sistemi. 2016. #2. S. 46-50.
14. Koshevoy N.D., Koshevaya I.I., Kostenko E.M. Primenenie metodov optimizatsii, osnovannykh na kode Greya, pri issledovanii tehnologicheskikh protsessov i priborov. VIsnik Hersonskogo natsIonalnoho tehnIchnogo unIversitetu. 2018. Tom 2. #3 (66). S. 241-245.

УДК 001.57:681.5.015: 681.542.35

А.М. МАЦУЙ, В.О. КОНДРАТЕЦЬ, А.А. АБАШИНА  
Центральноукраїнський національний технічний університет**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬОВОГО  
ЗАВАНТАЖЕННЯ ЦИКЛУ «МЛИН-КЛАСИФІКАТОР» В ПЕРШІЙ СТАДІЇ  
РУДОПІДГОТОВКИ**

Метою даної роботи є розробка підходу самоущільнення кульового молоткового середовища в окремих зонах вздовж барабана на основі аналізу роботи таких засобів з наступною перевіркою ефективності і забезпеченням зростання продуктивності та зменшенням перевитрати електроенергії і матеріалів. В публікації використано методи групування і аналізу попередніх досліджень, метод енергоозброєності кульового завантаження млина, метод імпульсу ударного стиснення, метод оцінювання технологічних і структурних параметрів і властивостей матеріалу, методи визначення продуктивності кульового млина, метод ідеалізації. Наукова новизна полягає в тому, що запропоноване нове кульове завантаження для млинів першої стадії подрібнення, яке в окремих зонах вздовж барабана самостійно формується з куль наближено однакового розміру і має вищу енергоозброєність до 19,36% порівняно з традиційним кульовим завантаженням. Практична значимість полягає в тому, що запропоновано конкретний підхід удосконалення кульового завантаження млина, який базується на використанні простих у виготовленні, менш вартісних і більш технологічних молоткових тіл-куль, що суттєво покращить характеристики кульового млина. Продуктивність кульових млинів наближено пропорційна щільності подрібнювального середовища, в якості якого використовують кулі. Різномірне кульове середовище, виконане за певними правилами, забезпечує більшу продуктивність, порівняно з однорозмірним, однак порожноти в ньому займають 38%, що значно зменшує його щільність, і як наслідок, продуктивність. Запропоновані альтернативні кулям молоткові засоби за різними причинами не можуть бути використаними. Однорозмірне кульове завантаження має більшу щільність, оскільки порожноти в ньому складають всього 26%. Щільність і енергоозброєність кульового завантаження, крім того, зростають зі зменшення діаметра куль. Якщо кулі в млині розсортувати за крупністю і розташувати їх за окремими зонами, то їх показник набагато зростає і вони будуть більш ефективно подрібнювати руду, що і запропоновано в даній роботі. Перевірка показала високу ефективність запропонованого кульового завантаження.

Ключові слова: кульове завантаження, підвищення щільності, альтернативні засоби, зональне розташування

А.Н. МАЦУЙ, В.А. КОНДРАТЕЦ, А.А. АБАШИНА  
Центральноукраинский национальный технический университет**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАРОВОЙ ЗАГРУЗКИ ЦИКЛА  
«МЕЛЬНИЦА-КЛАССИФИКАТОР» В ПЕРВОЙ СТАДИИ РУДОПОДГОТОВКИ**

Целью данной работы является разработка подхода самоуплотнения шаровой измельчающей среды в отдельных зонах вдоль барабана на основе анализа работы таких средств с последующей проверкой эффективности и обеспечением роста производительности и уменьшением перерасхода электроэнергии и материалов. В публикации использованы методы группировки и анализа предыдущих исследований, метод энерговооруженности шаровой загрузки мельницы, метод импульса ударного сжатия, метод оценки технологических и структурных параметров и свойств материала, методы определения производительности шаровой мельницы, метод идеализации. Научная новизна заключается в том, что предложенное новая шаровая загрузка мельниц первой стадии измельчения, которая в отдельных зонах вдоль барабана самостоятельно формируется из шаров приблизительно одинакового размера и имеет высокую энерговооруженность до 19,36% по сравнению с традиционной шаровой загрузкой. Практическая значимость заключается в том, что предложено конкретный подход усовершенствования шаровой загрузки мельницы, основанный на использовании простых в изготовлении, менее стоимостных и более технологических мелющих тел-шаров, что существенно улучшит характеристики шаровой мельницы. Производительность шаровых мельниц приблизительно пропорциональна плотности измельчающей среды, в качестве которой используют шары. Разноразмерная шаровая среда, выполненная по определенным правилам, обеспечивает большую производительность по сравнению с одноразмерной, однако порожноты в ней занимают 38%, что значительно уменьшает ее плотность, и как следствие, производительность. Предложены альтернативные шарам мелющие средства, по разным причинам не могут быть использованы. Одноразмерные шаровые загрузки имеют большую плотность, поскольку порожноты в ней составляют всего

26%. Плотность и энерговооруженность шаровой загрузки, кроме того, растут с уменьшением диаметра шаров. Если шары в мельнице рассортировать по крупности и расположить их по отдельным зонам, то их показатель намного возрастет, и они будут более эффективно измельчать руду, что и предложено в данной работе. Проверка показала высокую эффективность предложенной шаровой загрузки.

Ключевые слова: шаровая загрузка, повышение плотности, альтернативные средства, зональное расположение

A.N. MATSUI, V.A. KONDRATETS, A.A. ABASHINA  
Central Ukrainian National Technical University

### INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF THE BALL DOWNLOAD OF THE CYCLE "MILL-CLASSIFIER" CYCLE IN THE FIRST STAGE OF PREPARATION

*The aim of this work is to develop an approach of self-compacting a ball grinding medium in separate zones along the drum based on an analysis of the operation of such agents, followed by testing the effectiveness and ensuring productivity growth and reducing the overrun of electricity and materials. The publication used the methods of grouping and analyzing previous studies, the method of the power supply of a ball load mill, the method of impulse shock compression, the method of assessing technological and structural parameters and material properties, methods for determining the performance of a ball mill, the method of idealization. The scientific novelty lies in the fact that the proposed new ball loading of mills of the first grinding stage, which in some areas along the drum is independently formed from balls of approximately the same size and has a high electrical power ratio of up to 19.36% compared to the traditional ball loading. The practical significance lies in the fact that a specific approach has been proposed to improve the ball loading of the mill, based on the use of easy-to-make, less cost and more technological grinding bodies, which will significantly improve the characteristics of the ball mill. The performance of ball mills is approximately proportional to the density of the grinding medium, as used balls. The multi-dimensional spherical environment, made according to certain rules, provides greater performance compared to the one-dimensional one, however, it occupies 38% of voids, which significantly reduces its density, and as a result, performance. Alternative spheres are offered to the grinding media, for various reasons they cannot be used. One-dimensional ball loads have a greater density, since the voids in it are only 26%. The density and power of the ball load, in addition, increase with decreasing diameter of the balls. If the balls in the mill are sorted by size and arranged in separate zones, their indicator will increase significantly, and they will more effectively grind the ore, as proposed in this work. The test showed the high efficiency of the proposed ball load.*

Keywords: ball loading, density increase, alternative means, zonal arrangement

#### Постановка проблеми

Зменшення собівартості залізорудних концентратів, як сировинної основи чорної металургії, нині прагнуть досягти удосконаленням роботи в першу чергу перших стадій подрібнення-класифікації вихідної руди, де відбуваються великі перевитрати електроенергії та матеріалів. Велика увага приділяється автоматизації технологічних процесів і удосконаленню кульового господарства. Тому на ці не розв'язані задачі спрямовуються зусилля як наукових керівних органів, науково-дослідних організацій, підприємств, так і навчальних закладів, наприклад виконання держбюджетної теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942) плану науково-дослідних робіт Центральноукраїнського національного технічного університету. Оскільки втрати в першій стадії рудопідготовки вагомі, тема даної публікації є актуальною.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Увага першій стадії рудопідготовки на залізорудних збагачувальних фабриках вченими приділяється давно. В останні роки в Україні найбільш активно проводяться дослідження в напрямі автоматизації технологічних процесів викладені в роботах [1-8] та ін. В той же час удосконаленню кульового млина як об'єкта автоматизації приділяється значно менша увага. Вітчизняні кульові млини працюють на подрібнювальному середовищі з низькою групою твердості, хоч в Україні освоєно випуск куль з твердістю, яка відповідає світовому рівню. Не дивлячись на такі можливості, у підвищенні енергетики кульового завантаження майже нічого не досягнуто. Це стримує удосконалення кульових млинів даним підходом.

#### Мета дослідження

Метою даної публікації є системний аналіз засобів підвищення енергоефективності кульового завантаження млинів і на цій основі розробка підходу самоущільнення кульового молотного середовища в окремих зонах з наступною перевіркою його ефективності, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність агрегатів та зменшити перевитрати електроенергії, куль і футеровки.



**Викладення основного матеріалу дослідження**

Давно встановлено, що процес подрібнення руди на збагачувальних фабриках вимагає високих енергетичних витрат [9]. Нині проблема зменшення витрати енергії на тону подрібненого матеріалу розглядається в економічній, екологічній та збереження навколишнього середовища площинах. Напрями розв'язання цієї проблеми вчені вбачають в наступному [10]: оптимізація загальних витрат на рудопідготовку; використання малих нових конструкцій; покращення ефективності класифікації; автоматизація процесів подрібнення і класифікації; використання комп'ютерних прогнозуючих і оптимізуючих пакетів та ін.

Відомо, що продуктивність кульових млинів наближено пропорційна щільності подрібнювального середовища, причому зростання його твердості і якості форми також впливають сприятливо [11], оскільки збільшення щільності кульового завантаження приводить до значного зростання його енергоозброєності, тобто, відношенню маси молотильних тіл до маси подрібнювального матеріалу. Встановлено, що енергоозброєність щільного завантаження може зрости порівняно зі звичайним в 2...2,5 рази, а продуктивність технологічного агрегату – до 30% [12]. Автори роботи [13] ввели поняття елементарного акту одночасного впливу подрібнювального середовища на подрібнювальний матеріал в барабанному млині у вигляді імпульсу ударного стиснення (IYC), який можливо визначити співвідношенням

$$IYC = \frac{m_{MT}}{m_{PM}} = \frac{\gamma_{MT} \cdot V_{MT}}{\rho_{PM} \cdot V_{PM}}, \text{ кг/кг}, \quad (1)$$

де  $m_{MT}$  – маса молотильних тіл в одному кубічному метрі;  $m_{PM}$  – маса матеріалу, що знаходиться у проміжках між кулями і одночасно розмелюється;  $\gamma_{MT}$  – густина молотильних тіл;  $\rho_{PM}$  – насипна маса матеріалу, що розмелюється;  $V_{MT}$ ,  $V_{PM}$  – відповідно об'єми куль і матеріалу в проміжках між кулями в об'ємі завантаження, що розглядається.

Показник IYC дозволяє порівнювати між собою різні варіанти виконання подрібнювального середовища.

Запропонована нова форма подрібнювальних тіл, яку автори назвали сфероїдальними тетраедронами, забезпечує більш високу продуктивність і заново створені поверхні, які збільшують продуктивність барабанних млинів при тих же витратах енергії. Подібне молотильне середовище запропоновано і в роботі [14]. С.Ф. Шинкоренко запропонував сукупність молотильних тіл кулеподібної форми, призначену для завантаження в барабанний млин [14]. Вона складається з кулеподібних молотильних тіл з заглибленнями на поверхні, наприклад у вигляді замкнених кільцевих канавок, і кулеподібних молотильних тіл без заглиблень у співвідношенні 1/10-9/10. При цьому радіуси молотильних тіл без заглиблень повинні дорівнювати 1...0,5 радіуса поперечного перерізу заглиблень на молотильних кулях з заглибленнями. Ці співвідношення виконуються для всіх розмірів молотильних тіл, що завантажуються у млин. На думку автора дана молотильна суміш дозволить підвищити інтенсивність розмелу мінеральної сировини і продуктивність млина, а також зменшити питому витрату електроенергії.

Модель комбінованого молотильного середовища, запропонована А. Яценко [16], складається з куль і багатогранників з ввігнутими гранями з сферичними поверхнями. Оптимальний розмір ребра кубиків повинен дорівнювати радіусу куль. При русі даного молотильного середовища його найбільш імовірною і простою статичною упаковкою буде щільна гранецентрована гексагональна, коли кубики прагнуть розташуватися в просторі між кулями, торкаючись своїми ввігнутими гранями з опуклими поверхнями куль. Дана упаковка володіє повною симетрією в просторі відносно будь-якої з координат.

Запропоновані молотильні середовища випробовувалися лише в лабораторних умовах, що зазвичай триває недовго. Експериментальні дослідження включали оцінку технологічних і структурних параметрів і властивостей матеріалу, передбачених і викладених в роботі [17]. Експериментальні дані показують, що при інших однакових умовах подрібнювальне середовище, яке складене з сфероїдальних тетраедронів, забезпечує більш високі технологічні показники в процесі подрібнення порівняно з подрібнювальним середовищем, що складене з куль. Заново створена фракція крупності – 0,08 мм в середньому вище на 2,32%, а флотаційна крупність – 0,2 мм вище на 5,868%. Степінь подрібнення виявилася на дві одиниці вищою [18]. Як видно, показники не настільки високі порівняно зі складністю реалізації такого кульового завантаження. Виходячи з цього не можливо повністю охарактеризувати запропоновані комбіновані середовища. В той же час аналіз показує, що такі молотильні середовища будуть забезпечувати ефективність лише за умов, коли вони не спрацюються. Спрацювання цих молотильних середовищ порушить створені зв'язки між окремими елементами і достатньо імовірно, що вони будуть давати набагато гірші результати порівняно з кулями. Крім того, таке молотильне середовище при спрацюванні більш дрібних елементів, яких багато, створить велику кількість скрапу, що також сильно погіршує умови подрібнення.

Для формування щільного кульового завантаження більш вигідною може виявитись двокульова упаковка [12] з основних і більш дрібних, вписаних в пустоти між основними подрібнювальними тілами,

куль. Для такого подрібнювального середовища запропоновано можливі варіанти двокульових щільних упаковок, для яких імпульс ударного стиснення (IYC) в два рази вищий порівняно зі стандартним кульовим однорозмірним середовищем. Тут  $IYC=14,43$ , а в стандартній упаковці IYC дорівнює 7,3 [12]. Розрахунки показують, що на щільній кульовій упаковці продуктивність млина може бути в 1,6 рази вищою порівняно зі стандартним варіантом. Отже, тут результати більш вагомі, а реалізація значно простіша, оскільки технології виготовлення куль відпрацьовані і більш дешеві. Отже, цілком виправданим тут є лише використання куль, оскільки інші аспекти реалізації такого кульового завантаження не розглядалися. Тому проаналізуємо їх більш докладніше.

В розрахунках не враховувалося спрацювання молоткового середовища. При тривалій роботі будуть змінювати свої розміри як крупні, так і дрібні кулі. При цьому з дрібних куль створиться багато скрапу, який порушить роботу млина, а довантажувачі кулі не зможуть вирівняти попереднє положення. Тому таке кульове завантаження при тривалій роботі на міцних залізних рудах також не зможе забезпечити високої енергоефективності подрібнення.

Ефективність застосування раціонального кульового завантаження збільшується при використанні кулесортувальної футеровки млинів. Для млинів довжиною більше трьох метрів необхідно застосовувати футеровку з уступами вздовж барабана [19]. Така футеровка при роботі млина залишає крупні кулі на початку барабана, куди надходить крупна вихідна руда, а дрібні кулі переганяє в кінець млина, де присутні вже дрібні зерна подрібненого матеріалу. Сортування куль вздовж барабана млина здійснюється спеціальною кулесортувальною футеровкою, яка значно підвищує ефективність подрібнення руди. Тому застосування раціонального завантаження куль різного розміру в поєднанні з кулесортувальною футеровкою для рудних млинів МШЦ-5500×6500 є суттєвим фактором підвищення продуктивності подрібнення [19]. Конічно-східчаста футеровка, що починає використовуватися за кордоном і у вітчизняній промисловості з середини 70-х років минулого століття [20], удосконалюється і в теперішній час [21, 22]. Однак аналіз показує, що її застосування в кульових млинах, не може сприяти покращенню їх ефективності подрібнення руди.

Ще одним з можливих напрямів удосконалення барабанних млинів [23] є створення таких пристроїв в середині млина, які б руйнували застійні зони, інтенсифікували б рух молоткових тіл, забезпечували б класифікацію подрібнювального матеріалу в середині барабана, покращували б умови енергообміну між барабаном, футеровкою, молотковими тілами і матеріалом. Запропоновані такі енергообмінні пристрої для розміщення в середині барабана – це нахилені перегородки, діафрагми (кільця), спеціальні схеми та типи футеровок зі змінним коефіцієнтом зчеплення. Використання їх дозволяє створювати млини з поздовжньо-поперечним рухом молоткових тіл, завдяки чому змінюється характер і енергетичний режим роботи молоткових тіл, руйнуються застійні зони завантаження, зменшується споживана потужність привода. На думку авторів [23] використання таких енергообмінних пристроїв у кульових млинах дають підстави прогнозувати суттєву економію електроенергії, підвищення виробничого потенціалу розмельного обладнання в наслідок збільшення експлуатаційної надійності та ефективності процесу подрібнення. Однак, як показав аналіз, такі прийоми незастосовні на рудних кульових млинах і ними не можливо поліпшити роботу багатокомпонентних молоткових середовищ нового типу в умовах їх спрацювання.

Виходячи зі сказаного підвищувати ефективність роботи молоткового середовища доцільно використанням куль. Тобто, необхідно застосовувати раціональне завантаження кульового млина молотковим середовищем, яке містить кілька розмірів куль. При виборі раціонального завантаження слід зупинитись на можливих найменших розмірах куль, оскільки число ударів у млині збільшується при зменшенні їх розміру, зважаючи на зростання кількості молоткових тіл у тій же масі. Тому бажано використання куль найменшого розміру, при якому вони ще можуть добре подрібнювати матеріал даної крупності і твердості. Крім того, зменшення діаметра молоткових тіл приводить до зростання поверхні завантаження і сил тертя між кулями, а також до збільшення споживаної потужності [11]. Слід також відмітити, що насипна маса куль зі зменшенням їх розміру збільшується, що приводить до зростання енергоозброєності молоткового середовища та зростання споживаної потужності [11]. Ефективність млина характеризується відношенням ударних і вхідних енергій. Встановлено [24], що ефективність млина зменшується при збільшенні середнього розміру куль. Однак необхідно враховувати, що степінь впливу розміру куль на споживану потужність зменшується при збільшенні розміру млинів [11]. Залежність насипної ваги куль від їх розміру приведена в табл.1. З даних табл.1 слідує, що енергоозброєність куль, наприклад діаметром 30 мм порівняно з тілами розміром 100 мм, є більшою на 6,4%. Слід враховувати і те, що тонина помелу (якість подрібнення) на пряму залежить від співвідношення площі поверхні молоткового середовища  $S$  до його об'єму  $V$ . Чим більше значення цього співвідношення, тим більша тонина помелу, тобто подрібнення здійснюється більш якісно. Відомо, що чим менші геометричні розміри молоткових тіл, тим більший показник  $S/V$ . Для грубого подрібнення руди в першій стадії використовують крупні кулі діаметром від 120 до 70 мм. Так, один з найбільш крупних гірничозбагачувальних комбінатів України для первинного подрібнення вихідної руди тривалий час



використовував сталеві молотильні кулі діаметром 100 мм [25]. В кінці 2017 року розпочалися випробування з заміни молотильних куль 100 мм на тіла діаметром 80 мм з метою досягнення більш якісного подрібнення руди без зміни існуючих технологічних параметрів роботи збагачувальної фабрики, особливо уникнути зниження продуктивності кульових млинів. У середині 2018 року був отриманий результат, який показав ефективність використання куль діаметром 80 мм порівняно з молотильними тілами 100 мм. Приріст продуктивності по готовому класу склав більше 10%. При цьому також відмічено зниження питомої витрати молотильних тіл [25]. Для куль 100 мм відношення  $S/V=0,060$ , а для куль 80 мм – 0,075. Приріст цього відношення складає 25%. Отже, зменшення діаметра молотильного середовища можливо суттєво підвищити ефективність подрібнення руди.

У кульовому млині молотильне середовище представлене різними розмірами куль. У такому середовищі вільний простір між кулями складає 38% або 0,38 якщо первинний обсяг куль прийняти таким, що дорівнює одиниці. Тоді об'єм, зайнятий безпосередньо кулями складає 62% або 0,62 [26].

Дослідимо найбільш стійкий, який формується самостійно, стан розташування однорозмірних куль. Він є найбільш щільним і найбільш енергоозброєним. Задачу розглянемо у загальному вигляді, де тверде буде складеним з часток сферичної форми. Кулі будуть представляти один з граничних варіантів, де коефіцієнт розпушення складає

$$k_p = 6/\pi\sqrt{2} = 1,3514. \quad (2)$$

Коефіцієнт розпушення матеріалу, який складено з кульок однакової величини, не залежить від розміру сферичних тіл і є величиною постійною [27].

Відповідно визначенню коефіцієнт розпушення твердого  $k_p = V_3 / V_T$ ,  $V_3$  – загальний об'єм;  $V_T$  – об'єм твердого (куль) в об'ємі  $V_3$ . Для куль одного розміру  $k_p = V_3 / V_K = 1,3514$ , звідки  $V_K = 1/1,3514 = 0,74$ . Якщо  $V_K = 1$ , то незайнятий простір, де може розміститися подрібнюваний матеріал, складає  $V_{MK} = 0,26$  або 26%.

Таблиця 1

Залежність насипної ваги куль від їх розміру

| Діаметр куль, мм | Вага 1 м <sup>3</sup> куль, т | Відношення питомого значення ваги 1 м <sup>3</sup> куль до базового при $d_k=100$ мм | Покращення показника відносно куль діаметром 100 мм |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 100              | 4,560                         | 1,0                                                                                  | 0                                                   |
| 80               | 4,620                         | 1,013                                                                                | 1,3                                                 |
| 60               | 4,660                         | 1,022                                                                                | 2,2                                                 |
| 50               | 4,708                         | 1,032                                                                                | 3,2                                                 |
| 40               | 4,760                         | 1,044                                                                                | 4,4                                                 |
| 30               | 4,850                         | 1,064                                                                                | 6,4                                                 |

Визначимо значення імпульсу ударного стиснення для різнорозмірного кульового завантаження млина відповідно (1) при  $\gamma_{MT}=7860$  кг/м<sup>3</sup>;  $V_{MT}=0,62$  м<sup>3</sup>;  $\rho_{PM}=2046$  кг/м<sup>3</sup>;  $V_{PM}=0,38$  м<sup>3</sup>

$$IUC_P = \frac{7860 \cdot 0,62}{2046 \cdot 0,38} = 6,268.$$

Значення IUC для однорозмірного кульового завантаження при отриманих даних буде дорівнювати

$$IUC_O = \frac{7860 \cdot 0,74}{2046 \cdot 0,26} = 10,934.$$

Отже, в щільному кульовому завантаженні значення IUC зросло на 74,44%. Відповідно даному показнику ефективність подрібнення руди однорозмірними кулями суттєво зростає – на 74,44%, що дозволяє реалізувати даний підхід відомими молотильними тілами – кулями.

Щільність подрібнювального середовища у випадку різнорозмірних куль дорівнює

$$\rho_P = \frac{P_P}{V_{HP}} = \frac{7860 \cdot 0,62}{1,0} = 4873,2 \text{ кг/м}^3.$$

Щільність подрібнювального середовища у випадку однорозмірних куль дорівнює

$$\rho_O = \frac{P_O}{V_{HO}} = \frac{7860 \cdot 0,74}{1,0} = 5816,4 \text{ кг/м}^3.$$

Дослідами встановлено [26], що продуктивність кульового млина змінюється наближено прямо пропорційно щільності подрібнювального середовища. Тоді буде мати місце така залежність

$$Q_O = \frac{Q_P}{\rho_P} \rho_O, \quad (3)$$

де  $Q_O$  – продуктивність кульового млина при однорозмірному молотильному середовищі;  $Q_P$  – продуктивність кульового млина при різнорозмірному молотильному середовищі.

Якщо на даній руді при різнорозмірному молольному середовищі продуктивність кульового млина буде 170 т/год, то у випадку однорозмірного кульового навантаження вона зростає до 202,9 т/год, збільшившись в 1,19 разів. Це суттєве збільшення продуктивності і ним варто скористатись.

Слід також відмітити, що збільшення твердості подрібнювальних тіл і їх правильна геометрична форма також забезпечують деяке підвищення продуктивності кульового млина [26]. Для цього необхідно використовувати міцні кулі, враховуючи те, що використання молольних куль п'ятої групи твердості не приводить до скорочення терміну роботи сталевих бронеплит [28].

При роботі кульових млинів відбувається розшарування кульового завантаження, яке залежить від швидкості обертання барабана, форми поверхні бронеплит і зчеплення куль і матеріалу з броньфутеровкою [20]. Якщо в барабані, що обертається зі швидкістю  $n=0,85n_{\text{крит}}$  або більше, встановити конусну броньфутеровку з гладкою поверхнею, то в такому кульовому млині можливе сортування молольних тіл (куль) [20]. При цьому більш крупні кулі завжди переміщуються до розвантажувального кінця барабана, відтісняючи дрібні до завантажувального. В поперечних перерізах барабана при високих швидкостях його обертання спостерігається чітке розшарування молольних тіл. Крупні кулі концентруються в середній частині завантаження. Дрібні кулі, що мають більшу швидкість при обертанні, зосереджуються у зовнішніх рядах. Крупні кулі не виходять на поверхню броньової футеровки, а як би перекочуються на шарах дрібних куль.

Дрібні кулі за цих умов руху кульового завантаження виходять на зовнішні ряди і, досягнувши броньової футеровки, як би покривають її шаром, перегороджуючи доступ крупним молольним тілам. При великих швидкостях крупні кулі, зосереджуючись всередині завантаження, пересуваються на поверхні дрібних молольних тіл до кінця барабана [20].

Розшарування молольних тіл в поперечному перерізі барабана можливо пояснити тим, що центр маси малої кулі може бути ближче до внутрішньої стінки барабана млина, ніж центр маси великої кулі. В наслідок цього радіус обертання малих куль більший, а це означає більшу і швидкість порівняно з крупними кулями. Тому мала куля при обертанні барабана в наступних обертах піднімається вище і виявляється у зовнішньому шарі кульового завантаження. Більші ж кулі мають менші швидкості, піднімаються на меншу висоту і, відриваючись від броньфутеровки, залишаються в одному з внутрішніх шарів. В результаті великі кулі залишаються в середній частині завантаження і не змішуються з малими кулями у всій його масі.

Вміст кульового млина біля завантажувального кінця знаходиться на більш високій відмітці порівняно з розвантажувальним. При дозавантаженні різнорозмірних куль в заміні спрацьованих це приводить до скочування вздовж схилу молольних тіл. В процесі руху дрібні кулі легко провалюються між крупними і далеко не скочуються. Чим крупніші кулі, тим далі вони відкочуються. При цьому також відбувається перший етап поздовжньої сегрегації молольних тіл.

Дрібні кулі, зосереджені біля завантажувального кінця барабана, спрацьовуються і стають ще меншими. Оскільки вони знаходяться зверху над іншими, на цих неперервно діє вектор сили, що прагне їх пересунути до розвантажувального кінця. В певній ситуації зовсім малі кулі можуть потрапити у незайнятий простір більш великих куль і залишити свою зону перебування. Далі цей процес при більш крупних кулях здійснюється легше і вони потрапляють у розвантажувальний млина. Це процес імовірнісний і точно його визначити не можливо. Найбільш точні результати може забезпечити контроль виходу цих тіл з кульового млина. Зрозуміло, ці молольні елементи не виконали роботу, зв'язану з подрібненням руди і являють собою прямі втрати.

Рахуючи поздовжню сегрегацію молольних тіл ідеальною, можливо визначити їх розташування вздовж барабана кульового млина. Довжина барабана млина МШЦ 4,5×6,0 складає 6 м. При загальному кульовому завантаженні 155,52 т (40% об'єму млина) питома навантаження складає 25,92 т/м або 0,2592 т/см. Воно дозволяє визначити зони молольного середовища кульового млина за крупністю з залученням визначених мас куль різної крупності. Дані математичного моделювання приведені в табл.2.

Таблиця 2

**Характеристика зон розподілу молольного середовища за крупністю для кульового млина МШЦ 4,5×6,0 в усталеному режимі роботи**

| Діаметр куль, мм                                               | 10   | 20    | 30    | 40     | 50     | 60     | 70    | 80     |
|----------------------------------------------------------------|------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Маса куль, т                                                   | 3,67 | 9,93  | 19,44 | 32,0   | 27,16  | 29,03  | 19,44 | 14,85  |
| Довжина барабана, яку займають кулі даного розміру, см         | 14,6 | 38,31 | 75,00 | 123,46 | 104,78 | 112,00 | 75,00 | 57,29  |
| Половина діапазону, зайнятого кулями одного розміру, см        | 7,08 | 19,15 | 37,50 | 61,73  | 52,39  | 56,00  | 37,50 | 28,65  |
| Відстань від завантажувального кінця до середини діапазону, см | 7,08 | 33,31 | 89,96 | 189,19 | 303,31 | 411,7  | 505,2 | 571,35 |

З даних табл.2 слідує, що у кульовому млині вздовж барабана створюються зони молольного середовища з наближено однакою крупністю куль. Найбільш широкі зони відповідають кулям з

середнім діаметром 40 мм, 50 мм і 60 мм. Ці зони наближено мають однакову довжину, в них крупність куль знаходиться в межах 35...45 мм, 45...55 мм, 55...65 мм. Вони розташовані в середній частині барабана млина. Граничні зони на кінцях барабана в сумі мають наближено таку ж довжину, але складену з дрібних куль на завантажувальному та з крупних куль на розвантажувальному кінцях. Даний розподіл куль вздовж барабана млина підтверджено експериментально на діючих кульових млинах. Звукометричний сигнал при установці приймального пристрою в цих зонах суттєво змінював свої характеристики. Це можливо пояснити лише тим, що в конкретній зоні вздовж барабана млина розташовані різні за розміром кулі і певний за крупністю склад руди, оскільки загальне завантаження вихідного живлення стабілізувалося, а його крупність контролювалася і була практично незмінною.

Запропоновані засоби підвищення енергетичної ефективності з іншими (не кульовими) формами молочної середовища за різними причинами реалізованими не можуть бути.

Відомо, що існує певне оптимальне співвідношення між крупністю подрібнювального середовища і подрібнюваним матеріалом. Цю закономірність подрібнення автори роботи [29] сформулювали таким чином: витрата енергії на подрібнення матеріалу прямо пропорційна гранулометричному параметру завантаження або відношенню заново створених поверхонь подрібнюваної руди і подрібнювального середовища. При цьому гранулометричний параметр завантаження в кожну мить часу визначається при кульовому подрібненні як відношення середньозваженого діаметра куль до середньозваженого діаметра часток подрібнюваного матеріалу. Значення оптимального гранулометричного параметра в загальному випадку буде залежати від співвідношення діаметра пор в кульовому середовищі і розміру часток подрібнюваного матеріалу. Середній діаметр пор подрібнювального середовища можливо визначити за формулою [29]

$$d_{II} = kD_{KC} / P_{II}^{0.6}, \quad (4)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт;  $D_{KC}$  – середньозважений діаметр тіл подрібнювального середовища, м;  $P_{II}$  – гранулометричний параметр подрібнювального середовища.

Для однорозмірного подрібнювального середовища  $P_{II}=1$ ,  $d_{II}=kD_{KC}$ . Оптимальне відношення діаметра тіл подрібнювального середовища до середньозваженого діаметра часток дробленої руди, як встановлено, дорівнює  $D_{KC}/d_{CP}=10$ ,  $d_{II}/d_{CP}=10k$  [29], де  $d_{CP}$  – середньозважений діаметр часток подрібненої руди. Для різнорозмірного кульового середовища ці параметри повинні залишатися такими ж оптимальними.

Перевіримо на оптимальність отримане кульове завантаження. В основу покладемо дані, отримані в промисловому експерименті [30]. Значення середньозважених розмірів вихідної і подрібненої руди в чотирьох експериментах приведені в табл.3. Насамперед за даними табл.2 визначимо середньозважений діаметр запропонованого кульового завантаження млина МШЦ 4,5×6,0. Він дорівнює  $D_{KC}=49,8142$  мм. Оскільки кульове завантаження млина в процесі роботи підтримується автоматично,  $D_{KC}$  буде незмінною величиною. З даних табл.3 видно, що середньозважений розмір шматків руди у вихідному живленні змінюється в значних межах. В значних межах змінюється як середньозважений розмір часток руди у розвантаженні млина, так і середнє значення середньозважених часток руди у барабані. При подрібненні різної руди в кульовому млині параметр  $D_{KC}/d_{CP}$  змінюється в певних межах, але суттєво не відхиляється від оптимального значення 10. Осереднене значення параметра дорівнює 10,2185, що незначно відхилене від оптимального значення. Те ж можливо сказати і про параметр  $d_{II}/d_{CP}$ , якщо вважати, що кулі представлені одним розміром  $D_{KC}=49,8142$  мм. Тому можливо стверджувати, що запропоноване кульове завантаження млина МШЦ 4,5×6,0 є оптимальним.

Таблиця 3

**Значення середньозважених розмірів вихідної і подрібненої руди та показників  $D_{KC}/d_{CP}$  і  $d_{II}/d_{CP}$ , отриманих в промислових експериментах**

|                                                                               |        |        |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| Середньозважений розмір шматків руди у вихідному живленні кульового млина, мм | 10,1   | 9,74   | 7,97    | 8,51    |
| Середньозважений розмір часток руди у розвантаженні кульового млина, мм       | 0,581  | 0,578  | 0,962   | 0,769   |
| Середнє значення середньозважених часток руди у барабані кульового млина, мм  | 5,340  | 5,159  | 4,466   | 4,640   |
| Значення параметра $D_{KC}/d_{CP}$                                            | 9,327  | 9,656  | 11,155  | 10,737  |
| Значення параметра $d_{II}/d_{CP}$                                            | 9,327k | 9,656k | 11,155k | 10,737k |

### Висновки

Отже, в діючих кульових млинах можливо значно ущільнити молочне завантаження в окремих зонах і цим суттєво підвищити ефективність роботи технологічних агрегатів на традиційних молочних тілах, які більш технологічні у виготовленні і менш вартісні. Запропоноване кульове завантаження має оптимальне значення відношення середньозваженого діаметра куль до середньозваженого розміру часток подрібнюваного матеріалу, чим гарантується енергоефективність подрібнення руди і зростання продуктивності кульового млина.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що запропоноване нове кульове завантаження для млинів першої стадії подрібнення, яке в окремих зонах вздовж барабана самостійно формується з куль наближено однакового розміру і має вищу енергоозброєність до 19,36% порівняно з традиційним кульовим завантаженням.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропоновано конкретний підхід удосконалення кульового завантаження млина, який базується на використанні простих у виготовленні, менш вартісних і більш технологічних куль, що суттєво покращує характеристики кульового млина.

Перспективою подальших розробок є дослідження взаємодії даного кульового завантаження з подрібнюваною рудою вздовж барабана кульового млина.

#### Список використаної літератури

1. Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В. Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе  $H_\infty$ -нормы. *Гірничий вісник*. 2014. Вип.98. С. 83-85.
2. Vladimir Morkun, Vitaliy Tron. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 4-7.
3. Vladimir Morkun, Vitaliy Tron. Ecological and economic optimization of iron ore processing automated control, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 8-11.
4. Vladimir Vladimir Morkun, Sergij Tcvirkun. Investigation of methods of fuzzy clustering for determining ore types, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 12-15.
5. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. Кривий Ріг: Вид-во КТУ, 2008. 204 с.
6. Моркун Н.В. Розподілене оптимальне керування взаємопов'язаними процесами збагачувального виробництва на основі динамічної просторово-часової моделі: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.13.07 / Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. Сєверодонецьк, 2016. 41 с.
7. Азарян А.А., Кривенко Ю.Ю., Кучер В.Г. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд. *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. Вип.36. С. 276-280.
8. Иванов А.Б., Куваев В.Н., Куваев Я.Г. Перспективные направления автоматизации процессов дробления и измельчения. *Горный журнал*. 2010. №11. С. 74-76.
9. Crow W.L. Grinding Ball Rationing. *Mining Engineering*. 1957. Vol.9. p.p. 750-752.
10. Tzotzorkov L., Penchev T., Bodurov P., Kuzev L. Comparative Studies on Balls Versus Spheroidal Tetrahedrons Working Media to Ore Grinding in an Industrial Drum Mill. *XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC 2010)* (6-10 September 2010, Brisbane). Brisbane, Australia, 2010. p. 1299-1309
11. Измельчение. Энергетика и технология / Пивняк Г.Г. и др. Москва: Изд. дом «Руда и металлы», 2007. 226 с.
12. Барбанягрэ В.Д., Матвеев А.Ф., Смаль Д.В., Москвичев Д.С. Интенсификация процессов тонкого измельчения материалов в шаровых трубных мельниках. *Сб. трудов Региональной научно-технической конференции по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам* (25-26 февраля 2016 г., Белгород). Белгород, 2016. С. 44-49.
13. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: Наука, 1993. 218 с.
14. Jain S.K. Ore processing. Oxford & IBN Publishing Company, 1986. P. 518.
15. Совокупность мелющих тел, загружаемых в мельнику: пат. 2297280 РФ: МПК В02С 17/20. №2005133233/03; заявл. 28.10.05; опубл. 20.04.2007. Бюл.№11. 5 с.
16. Яценко А.А. О повышении эффективности работы шаровых мельниц на основе использования комбинированной мелющей загрузки. *Обогащение руд*. 2011. №3. С. 3-5.
17. Gyes R. Problems and development of Material Grinding. Moscow: Publishing House of Literature on Construction, 1964. P. 342.
18. Читалов Л.С., Фадина А.В., Андреев Е.Е., Львов В.В. Новая энергоэффективная измельчающая среда для шаровых барабанных мельниц. *Записки Горного института*. 2013. Т.206. С. 143-145.
19. Баатархуу Ж., Даваацэрэн Г., Биленко П.Ф. Об одном из путей интенсификации процесса измельчения в шаровых мельницах МШЦ-5500-6500 на комбинате «ЭРДЭНЭТ». *Обогащение руд*. 2000. №3. С. 3-5.
20. Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин Г.С. Измельчение материалов в цементной промышленности. Москва: Изд. лит. по строительству, 1966. 270 с.
21. Сортирующая бронефутеровка барабанных мельниц (варианты): пат. 2314160 РФ: МПК В02С 17/22. №2005136934/03; заявл. 28.11.05; опубл. 10.01.2008. Бюл.№1. 7 с.



22. Хахалев П.А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Белг. гос. техн. ун-т им. В.Г. Шухова. Белгород, 2017. 16 с.
23. Богданов В.С., Богданов Н.С., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности процесса измельчения в шаровых мельницах. *Горный журнал*. 1986. № 11. С. 35-37.
24. Jayasundara C.T., Yang R.Y., Yu A.B. Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 33. pp. 66-71.
25. Зависимость тонины помола от размера мелющих тел. URL: <http://www.energosteel.com/zavisimost-toninyi-pomols-ot-razmera-melyuschi-h-tel> (дата звернення: 16.08.2018).
26. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. – 415 с.
27. Кондратец В.О., Мацуй А.М. Сферична частинка твердого певного розміру як основа процесу моделювання розпушення гірських порід. *Математичне моделювання*. 2016. №2 (33). С. 55-59.
28. Совместимость мелющих шаров 5-й группы твердости с бронеплитами мельниц. URL: <http://www.energosteel.com/melyshhie-shary-broneplity/> (дата звернення: 12.12.2016).
29. Куприн А.И., Клешнин А.А., Федоренко Г.И. Влияние состава загрузки мельниц на эффективность измельчения. *Горный журнал*. 1989. №1. С. 46-48.
30. Мацуй А.М., Кондратец В.О. Моделювання середньозваженої крупності твердого в завантаженні кульового млина рудою і пісками класифікатора. *Математичне моделювання*. 2017. №1 (36). С. 59-66.

#### References

1. Morkun V.S., Morkun N.V., Tron' V.V. Formirovanie robastnogo avtomatizirovannogo upravleniya zamknutym tsiklom izmel'cheniya na osnove  $N_{\infty}$ -normy. *Girnichii visnik*. 2014. Vip.98. S. 83-85.
2. Vladimir Morkun, Vitaliy Tron. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 4-7.
3. Vladimir Morkun, Vitaliy Tron. Ecological and economic optimization of iron ore processing automated control, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 8-11.
4. Vladimir Vladimir Morkun, Sergij Tcvirkun. Investigation of methods of fuzzy clustering for determining ore types, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. No5. p.p. 12-15.
5. Kupin A.I. Intelktualna identyfikatsiia ta keruvannia v umovakh protsesiv zbahachuvalnoi tekhnolohii. *Kryvyi Rih: Vyd-vo KTU*, 2008. 204 s.
6. Morkun N.V. Rozpodilene optymalne keruvannia vzaïemopoviazanykh protsesamy zbahachuvalnoho vyrobnytstva na osnovi dynamichnoi prostoro-vo-chasovoï modeli: avtoref. dys. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.13.07 / Skhidnoukr. nats. un-t im. Volodymyra Dalia. Sievierodonetsk, 2016. 41 s.
7. Azaryan A.A., Krivenko Yu.Yu., Kucher V.G. Avtomatizatsiya pervoi stadii izmel'cheniya, klassifikatsii i magnitnoi separatsii – real'nyi put' povysheniya effektivnosti obogashcheniya zheleznykh rud. *Visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu*. 2014. Vip.36. S. 276-280.
8. Ivanov A.B., Kuvaev V.N., Kuvaev Ya.G. Perspektivnye napravleniya avtomatizatsii protsessov drobleniya i izmel'cheniya. *Gornyi zhurnal*. 2010. №11. S. 74-76.
9. Crow W.L. Grinding Ball Rationing. *Mining Engineering*. 1957. Vol.9. p.p. 750-752.
10. Tzotzorkov L., Penchev T., Bodurov P., Kuzev L. Comparative Studies on Balls Versus Spheroidal Tetrahedrons Working Media to Ore Grinding in an Industrial Drum Mill. *XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC 2010)* (6-10 September 2010, Brisbane). Brisbane, Australia, 2010. p. 1299-1309
11. Izmel'chenie. Energetika i tekhnologiya / Pivnyak G.G. i dr. Moskva: Izd. dom «Ruda i metally», 2007. 226 s.
12. Barbanyagre V.D., Matveev A.F., Smal' D.V., Moskvichev D.S. Intensifikatsiya protsessov tonkogo izmel'cheniya materialov v sharovykh trubnykh mel'nikakh. Sb. trudov regional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po itogam orïentirovannykh fundamental'nykh issledovaniï po mezhdistsiplinarnym temam (25-26 fevralya 2016 g., Belgorod). Belgorod, 2016. S. 44-49.
13. Krykhtin G.S., Kuznetsov L.N. Intensifikatsiya raboty mel'nits. Novosibirsk: Nauka, 1993. 218 s.
14. Jain S.K. Ore processing. Oxford & IBH Publishing Company, 1986. P. 518.
15. Sovokupnost' melyushchikh tel, zagruzaemykh v mel'niku: pat. 2297280 RF: MPK V02S 17/20. №2005133233/03; zayavl. 28.10.05; opubl. 20.04.2007. Byul.№11. 5 s.
16. Yatsenko A.A. O povyshenii effektivnosti raboty sharovykh mel'nits na osnove ispol'zovaniya kombinirovannoi melyushchei zagruzki. *Obogashchenie rud*. 2011. №3. S. 3-5.

17. Gyes R. Problems and development of Material Grinding. Moscow: Publishing House of Literature on Construction, 1964. P. 342.
18. Chitalov L.S., Fadina A.V., Andreev E.E., L'vov V.V. Novaya energoeffektivnaya izmel'chayushchaya sreda dlya sharovykh barabannykh mel'nits. Zapiski Gornogo instituta. 2013. T.206. S. 143-145.
19. Baatarkhuu Zh., Davaatseren G., Bilenko P.F. Ob odnom iz putei intensifikatsii protsessa izmel'cheniya v sharovykh mel'nitsakh MShTs-5500-6500 na kombinatе «ERDENET». Obogashchenie rud. 2000. №3. S. 3–5.
20. Deshko Yu.I., Kreimer M.B., Krykhtin G.S. Izmel'chenie materialov v tsementnoi promyshlennosti. Moskva: Izd. lit. po stroitel'stvu, 1966. 270 s.
21. Sortiruyushchaya bronefuterovka barabannykh mel'nits (varianty): pat. 2314160 RF: MPK V02S 17/22. №2005136934/03; zayavl. 28.11.05; opubl. 10.01.2008. Byul.№1. 7 s.
22. Khakhalev P.A. Sovershenstvovanie konstruktсии stupenchatoi futerovki i issledovanie protsessа izmel'cheniya v sharovoi barabannoi mel'nitse: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.13 / Belg. gos. tekhn. un-t im. V.G. Shukhova. Belgorod, 2017. 16 s.
23. Bogdanov V.S., Bogdanov N.S., Vorob'ev N.D. Povyshenie effektivnosti protsessа izmel'cheniya v sharovykh mel'nikakh. Gornyi zhurnal. 1986. № 11. S. 35-37.
24. Jayasundara C.T., Yang R.Y., Yu A.B. Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 33. pp. 66-71.
25. Zavisimost' toniny pomola ot razmera melyushchikh tel. URL: <http://www.energosteel.com/zavisimost-toniny-pomols-ot-razmera-melyushchih-tel> (data zvernennya: 16.08.2018).
26. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh. Moskva: Nedra, 1980. – 415 s.
27. Kondratets V.O., Matsui A.M. Sferychna chastynka tverdoho pevnogo rozmiru yak osnova protsesu modeliuvannia rozpushennia hirskykh porid. Matematychnе modeliuvannia. 2016. №2 (33). S. 55-59.
28. Sovmestimost' melyushchikh sharov 5-i gruppy tverdosti s broneplitami mel'nits. URL: <http://www.energosteel.com/melyshhie-shary-broneplity/> (data zvernennya: 12.12.2016).
29. Kuprin A.I., Kleshnin A.A., Fedorenko G.I. Vliyanie sostava zagruzki mel'nits na effektivnost' izmel'cheniya. Gornyi zhurnal. 1989. №1. S. 46-48.
30. Matsui A.M., Kondratets V.O. Modeliuvannia serednozvazhenoi krupnosti tverdoho v zavantazhenni kulovoho mlyna rudoiu i piskamy klasyfikatora. Matematychnе modeliuvannia. 2017. №1 (36). S. 59-66.



УДК 539.3

Р.С.МУСІЙ, Н.Б.МЕЛЬНИК, Х.Т.ДРОГОМИРЕЦЬКА,  
Б.Й.БАНДИРСЬКИЙ, Л.В.ГОШКО  
Національний університет "Львівська політехніка"

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОГО РЕЖИМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА ДІЇ АМПЛІТУДНО МОДУЛЬОВАНОГО РАДІОІМПУЛЬСА**

*Здійснено математичну постановку комплексної початково-крайової задачі для визначення параметрів нестационарного електромагнітного поля і температури. Запропоновано методику побудови розв'язків сформульованих початково-крайових задач з використанням кубічної апроксимації. Це дало змогу звести сформульовані початково-крайові задачі до задач Коші на інтегральні характеристики ключових функцій, які розв'язано з допомогою інтегрального перетворення Лапласа. Досліджено температурно-силовий режим функціонування пластинчастого електропровідного елемента за дії амплітудно модульованого радіоімпульса.*

*Ключові слова: електропровідна пластина, амплітудно модульований радіоімпульс, несуча і резонансна частоти, джоулеві тепловиділення, пондеромоторна сила, температура.*

Р.С.МУСІЙ, Н.Б.МЕЛЬНИК, Х.Т.ДРОГОМИРЕЦКАЯ,  
Б.И.БАНДЫРСКИЙ, Л.В.ГОШКО  
Национальный университет "Львовская политехника"

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АМПЛИТУДНО МОДУЛИРОВАННОГО РАДИОИМПУЛЬСА**

*Осуществлена математическая постановка комплексной начально-краевой задачи для определения параметров нестационарного электромагнитного поля и температуры. Предложена методика построения решений сформулированных начально-краевых задач с использованием кубической аппроксимации. Это позволило свести сформулированные начально-краевые задачи к задачам Коши на интегральные характеристики ключевых функций, которые решены с помощью интегрального преобразования Лапласа. Исследован температурно-силовой режим функционирования пластинчатого электропроводного элемента при воздействии амплитудно модулируемого радиоимпульса.*

*Ключевые слова: электропроводная пластина, амплитудно модулированный радиоимпульс, несущая и резонансная частоты, джоулевы тепловыделения, пондеромоторная сила, температура.*

R.S.MUSII, N.B.MELNYK, K.T.DROHOMYRETSKA,  
B.J. BANDYRSKYJ, L.V.HOSHKO  
Lviv National Polytechnical University

### **DETERMINATION OF TEMPERATURE-POWER REGIME OF FUNCTIONING OF ELECTROCONDUCTIVE TABULAR ELEMENT UNDER THE INFLUENCE OF AMPLITUDE MODULATED RADIOIMPULSE**

*The mathematical formulation of a complex initial-boundary value problem for an electroconductive lamellar element, which is under a homogeneous non-stationary electromagnetic action, is carried out. The material of the element is homogeneous, isotropic and non-ferromagnetic. Physical and mechanical characteristics of the material are assumed to be constant in the considered range of temperature changes. The element is in a convective heat exchange with an external environment. The bases of the lamellar element are without surface force loads. The action of a non-stationary electromagnetic field on an element is manifested by two physical factors - the Joule heat ejections and the ponderomotive forces. The Joule heat ejections cause the appearance of a non-stationary temperature field. This field together with the ponderomotive forces create the corresponding temperature-force regime of operation of the element under consideration, which is used as an actuator and sensor in modern aviation and ship anti-icing systems. For determining such temperature-force regime, an appropriate physical-mathematical model is proposed. On the basis of this model, determination of the parameters of the electromagnetic field - the ponderomotive forces and temperature is done in two stages. At the first stage, from the Maxwell's equations, the component of the magnetic field strength vector, which is tangent to the bases of the element, the Joule heat ejections and the ponderomotive forces are determined. At the second stage, from the heat equation, in which the Joule heat ejections are used as heat sources, we determine*

*the non-stationary temperature distribution of in the element. The methodology of construction of solutions for the formulated initial boundary value problems for the key functions - tangential component of the magnetic field strength vector and temperature is proposed. This methodology uses the approximation by the cubic polynomials for the distribution of the key functions in a thickness coordinate. This makes it possible to reduce the formulated initial-boundary value problems for the key functions to the Cauchy's problems in the time variable on the integral (over the thickness variable) characteristics of the key functions. Using the integral transform on the time variable, we obtain the expressions of integral characteristics for a homogeneous non-stationary electromagnetic action. On this basis, the temperature-force regime of operation of the lamellar electroconductive element under the action of the amplitude-modulated radioimpulse is investigated.*

*Keywords: electroconductive plate, amplitude modulated radioimpulse, carrier and resonance frequencies, the Joule heat, ponderomotive force, temperature.*

### Постановка проблеми

В авіаційних та корабельних системах протиобледеніння в якості актуаторів і сенсорів механічних коливань елементів конструкцій для ліквідації нашарувань на них льоду використовують електропровідні пластинчасті елементи. Ці елементи працюють за дії нестационарних електромагнітних полів (НЕМП). Для забезпечення надійної роботи таких елементів і прогнозування їх нормального функціонування за вказаної дії є актуальним моделювання їх температурно-силового режиму.

Тому необхідна розробка математичної моделі, яка би враховувала крім природніх поверхневих теплових і силових факторів впливу на роботоздатність та надійність таких актуаторів і сенсорів, також додаткові об'ємні теплові і силові фактори - джоулеве тепло  $Q$  та пондеромоторні сили  $\vec{F}$ , зумовлені дією НЕМП [1].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомі окремі роботи про методику визначення та дослідження температурно-силового режиму роботи пластинчастих елементів за поверхневих теплового нагріву і силового навантаження [2, 3]. У цих публікаціях досліджено температурні поля і напруження в тілах канонічної форми, зокрема пластинах, за дії теплового удару та поверхневого теплового імпульсу. Однак, у пластинчастих елементах, виготовлених з електропровідних матеріалів, що функціонують за дії НЕМП, виникають додаткові об'ємні нестационарні джерела тепла і пондеромоторні сили. Ці додаткові фізичні фактори створюють відповідний температурно-силовий режим роботи розглядуваного елемента. Проте дослідження температурно-силового режиму роботи пластинчастих елементів за дії НЕМП вивчено недостатньо.

### Мета дослідження

Дана робота присвячена опису фізико-математичної моделі для визначення температурно-силового режиму функціонування електропровідного пластинчастого елемента за дії НЕМП та розробці методики розв'язування відповідних початково-крайових задач для знаходження параметрів НЕМП і температури у пластинчастому елементі, дослідженню на цій основі його температурно-силового режиму за дії амплітудно модульованого радіоімпульсу.

Це є актуальним завданням для оптимізації проектування і розрахунку надійності роботи пластинчастих актуаторів і сенсорів, що працюють за дії амплітудно модульованих радіоімпульсів, які використовуються у системах проти обледеніння.

### Математична постановка задачі

Розглядається електропровідний актуатор чи сенсор у вигляді пластини постійної товщини  $2h$  віднесеної до декартової системи координат  $(x, y, z)$ , площина  $xOy$  якої співпадає зі серединною поверхнею пластини. Матеріал пластини однорідний, ізотропний, неферомагнітний, а його фізико-механічні характеристики постійні в розглядуваному діапазоні зміни температури елемента. Пластина зазнає впливу НЕМП, заданого значеннями дотичної компоненти  $H_y$  вектора напруженості магнітного поля  $\vec{H} = \{0; H_y; 0\}$  на її поверхнях  $z = \pm h$ , які перебувають в умовах конвективного теплообміну з довкіллям і вільні від силового поверхневого навантаження. За визначальні функції для визначення температурно-силового режиму даної пластини вибрано компоненту  $H_y(z, t)$  вектора  $\vec{H}$  і температуру  $T(z, t)$ . Ці функції є функціями товщинної змінної  $z$  та часу  $t$ .

Математична модель визначення термосилового режиму пластини за дії НЕМП складається з двох етапів. На першому етапі зі співвідношень Максвелла визначається НЕМП, яке описується вектором  $\vec{H}$ , та зумовлені ним об'ємно розподілені нестационарні джерела джоулевого тепла  $Q$  і пондеромоторні сили  $\vec{F}$  за врахування заданих початкової і крайових умов. На другому - з рівняння теплопровідності, в якому джерела джоулевого тепла  $Q$  є об'ємними нестационарними джерелами тепла, визначається нестационарне температурне поле  $T$  за заданих початкової і крайових умов. Розглянемо послідовно кожний з етапів.

Відмінна від нуля компонента  $H_y(z, t)$  вектора  $\vec{H}$  в пластині визначається з рівняння

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} - \sigma \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

за граничних умов на поверхнях  $z = \pm h$  пластини

$$H_y(-h, t) = H_y^-(t), \quad H_y(h, t) = H_y^+(t)$$

та нульової початкової умови

$$H_y(z, 0) = 0.$$

Тут  $H_y^-(t)$ ,  $H_y^+(t)$  – задані функції часу, які описують конкретний характер зміни в часі НЕМП,  $\sigma$ ,  $\mu$  – коефіцієнти електропровідності та магнітна проникність матеріалу пластини.

За знайденою з рівняння (1) при зазначених граничних та початковій умовах функцією  $H_y(z, t)$  записуємо питомі густини джоулевого тепла  $Q(z, t)$  та пондеромоторних сил  $\vec{F} = \{0; 0; F_z(z, t)\}$  у вигляді співвідношень

$$Q = \frac{1}{\sigma_n} \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)^2, \quad (2)$$

$$F_z = -\mu \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) H_y. \quad (3)$$

За обчисленими зі співвідношень (2) і (3) питомими густинами джоулевого тепла  $Q(z, t)$  визначаємо розподіл температури  $T(z, t)$  у пластині з рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{Q}{\lambda}, \quad (4)$$

зокрема, за крайових умов теплоізоляції на внутрішній і зовнішній поверхнях пластини

$$\frac{\partial T(\pm h, t)}{\partial z} = 0$$

та нульової початкової умови

$$T(z, 0) = 0.$$

Тут  $\kappa$ ,  $\lambda$  – коефіцієнти температуро- і теплопровідності матеріалу пластини. Зауважимо, що у випадку конвективного теплообміну записані граничні умови теплоізоляції поверхонь пластини замінюємо відповідними умовами конвективного теплообміну.

#### Методика побудови розв'язків сформульованих початково-крайових задач

Для розв'язування сформульованих початково-крайових задач апроксимуємо розподіли визначальних функцій  $H_y(z, t)$ ,  $T(z, t)$  за товщиною змінною  $z$  по товщині пластини кубічними многочленами

$$H_y(z, t) = \sum_{i=0}^3 a_i(t) z^i, \quad (5)$$

$$T(z, t) = \sum_{i=0}^3 b_i(t) z^i. \quad (6)$$

Коефіцієнти  $a_i(t)$ ,  $b_i(t)$  апроксимаційних поліномів (5), (6) визначаємо через інтегральні характеристики  $H_{ys}(t)$ ,  $T_s(t)$  ключових функцій  $H_y(z, t)$ ,  $T(z, t)$

$$H_{ys}(t) = \int_{-h}^h H_y(z, t) z^{s-1} dz, \quad s=1,2 \quad (7)$$

$$T_s(t) = \int_{-h}^{rh} T(z, t) z^{s-1} dz, \quad s=1,2 \quad (8)$$

та задані крайові умови на поверхнях  $z = \pm h$  пластини. Для знаходження інтегральних характеристик  $H_{ys}(t)$  і  $T_s(t)$  вихідні рівняння (1), (4) інтегруємо відповідно до (7), (8) за врахування виразів (5), (6).

В результаті вихідні початково-крайові задачі для визначення ключових функцій  $H_y(z, t)$  та  $T(z, t)$  зведено до відповідних задач Коші на інтегральні характеристики цих функцій, які описуються системами рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dH_{y1}(t)}{dt} - d_1 H_{y1}(t) - d_2 H_{y2}(t) = d_3 H_y^-(t) + d_4 H_y^+(t), \\ \frac{dH_{y2}(t)}{dt} - d_5 H_{y1}(t) - d_6 H_{y2}(t) = d_7 H_y^-(t) + d_8 H_y^+(t), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} + d_1^T T_1 + d_2^T T_2 = W_1(t), \\ \frac{dT_2}{dt} + d_3^T T_1 + d_4^T T_2 = W_2(t) \end{cases} \quad (10)$$

і розв'язуються за відповідних згідно (7), (8) початкових умов. Коефіцієнти  $d_{1 \div 8}$ ,  $d_{1 \div 4}^T$  визначаються через геометричні параметри пластини та фізико-механічні характеристики її матеріалу,  $W_s(t)$  ( $s=1,2$ ) – права частина рівняння теплопровідності (4), зінтегрована відповідно до (8).

Застосовуючи інтегральне перетворення Лапласа по часу  $t$ , розв'язки задач Коші (9), (10) записуємо у вигляді згорток функцій, що описують задані крайові умови та однорідні розв'язки. Отримуємо вирази

$$H_y(z, t) = \sum_{i=0}^3 \left\{ \sum_{s=1}^2 a_{is} \sum_{k=10}^2 \int_0^t [A_{s1}(k) H_y^-(\tau) + A_{s2}(k) H_y^+(\tau)] e^{p_k(t-\tau)} d\tau + a_{i3} H_y^-(t) + a_{i4} H_y^+(t) \right\} z^i \quad (11)$$

для компоненти  $H_y(z, t)$  та

$$T(r, t) = \sum_{k=0}^3 \sum_{s=1}^2 \left( b_{ks} \sum_{m=10}^2 \int_0^t [B_{s1}(m) W_1(\tau) + B_{s2}(m) W_2(\tau)] e^{p_m(t-\tau)} d\tau \right) z^k \quad (12)$$

для температури  $T(z, t)$ . Тут  $A_{s1}(k)$ ,  $A_{s2}(k)$  ( $s=1,2$ ) – вирази, що залежать від коренів  $p_k$  ( $k=1,2$ ) характеристичного рівняння системи (9);  $B_{s1}(m)$ ,  $B_{s2}(m)$  ( $s=1,2$ ) – вирази, що відповідають неоднорідним розв'язкам системи (10) і залежать від коренів  $p_m$  ( $m=1,2$ ) її характеристичного рівняння.

На основі отриманих загальних співвідношень (11), (2), (3), (12) для однорідної нестационарної електромагнітної дії приведемо результати числового аналізу температурно-силового режиму пластинчастого електропровідного сенсора за дії АМРІ.

### Дослідження температурно-силового режиму за дії АМРІ

Дія АМРІ математично описується функцією  $H_y^\pm(t)$  у вигляді [4]

$$H_y^{\pm}(t) = k_0 H_0 (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}) \cos \omega t. \quad (13)$$

Тут  $k_0$  – нормувальний множник,  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – параметри, що характеризують відповідно часи фронтів наростання  $t_{iner}$  і спадання  $t_{dekr}$  модульованого імпульса тривалості  $t_i$ ,  $H_0$  – максимальне значення напруженості магнітного поля в АМРІ,  $\omega$  – частота несучих електромагнітних коливань.

Підставляючи вираз (13) у формули (11), (2), (3) і (12), записуємо вирази нестационарних об'ємної пондеромоторної сили та температури у розглядуваному пластинчастому сенсори за дії АМРІ.

Проаналізовано джоулеве тепло  $Q$ , компоненту  $F_z$  пондеромоторної сили  $\vec{F}$  та температуру  $T$  у даному сенсори товщиною  $2h = 2\text{ мм}$ , виготовленого із нержавної сталі Х18Н9Т. Характеристики  $\beta_1$  і  $\beta_2$  відповідають тривалості модульованого імпульса  $t_i = 100\text{ мкс}$ , кругова частота  $\omega = 628000\text{ 1/с}$ .

На рис. 1,2,3 показано зміну в часі джоулевого тепла  $Q$ , пондеромоторної сили  $F_z$  та температури  $T^Q$  ( $T^Q$  – температура зумовлена джоулевым теплом  $Q$ ). Лінії 1, 2, 3 на рисунках відповідають значенням товщинної координати  $z = h; 0,5h; 0$ . Отримано, що максимальні значення розглядувані величини досягають на поверхні пластини, а мінімальні – на її серединній поверхні.

Рис. 4 ілюструє зміну в часі сумарної температури  $T = T^Q + T^F$  ( $T^F$  – температура сенсори зумовлена його деформуванням пондеромоторною силою  $\vec{F}$ ) за частоти несучих електромагнітних коливань  $\omega = \omega_{r1} = 4,678 \cdot 10^6\text{ 1/с}$ . Тут  $\omega_{r1}$  – перша резонансна частота несучих електромагнітних коливань для даного сенсори. Лінії 1-3 на рис. 4 відповідають значенням таких ліній на рис. 3. Отримано, що за використання даної несучої частоти  $\omega_{r1}$  максимальні значення сумарної температури зростають приблизно у 8-10 разів порівняно з такими значеннями цієї температури за частоти  $\omega = 628000\text{ 1/с}$  (дана частота знаходиться поза околom резонансної частоти  $\omega_{r1}$ ).

Зауважимо, що вклад складника температури  $T^F$  в сумарну температуру за частоти  $\omega = 628000\text{ 1/с}$  порівняно зі складовою  $T^Q$  є нехтовно малий. Відповідно, за частоти  $\omega = \omega_{r1}$  вклад складника температури  $T^F$  складає 20-25% порівняно з вкладом складника  $T^Q$ . Зміна сумарної температури  $T^Q + T^F$  за частоти  $\omega = \omega_{r1}$  має осцилюючий характер відповідно до характеру зміни в часі пондеромоторної сили, а її максимальні значення є на порядок вищі за такі ж значення сумарної температури за частоти  $\omega = 6,28000\text{ 1/с}$ .

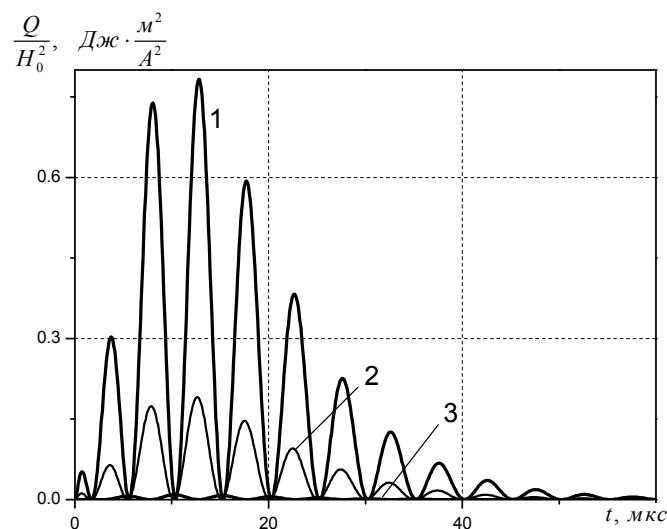


Рис. 1. Зміна в часі джоулевих тепловиділень в пластинчастому елементі

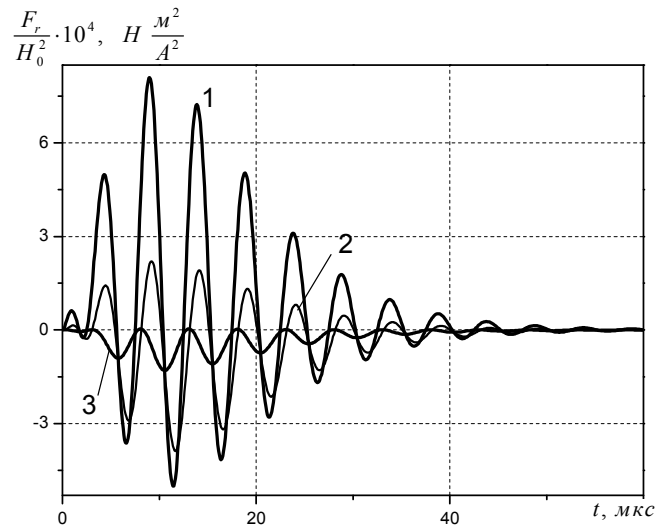
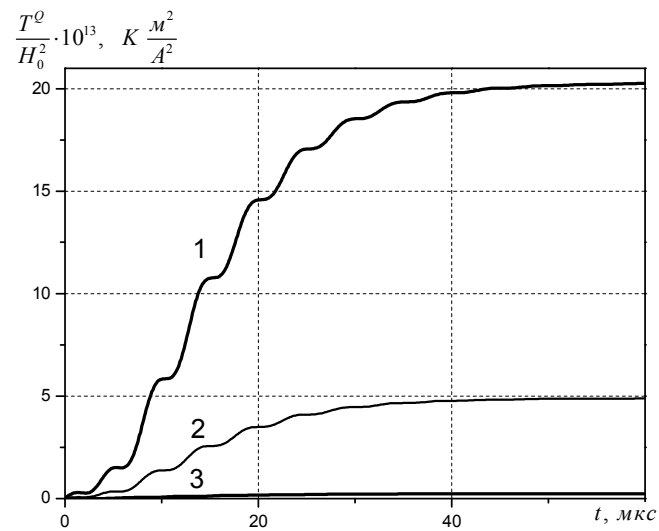
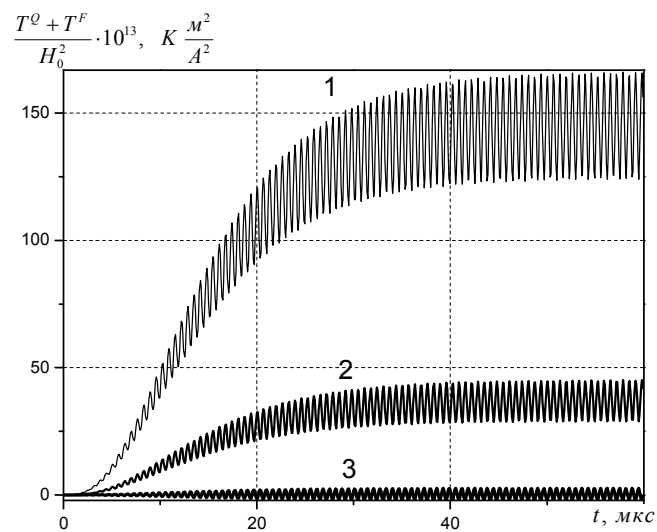


Рис. 2. Зміна в часі пондеромоторної сили в пластинчастому елементі

Рис. 3. Зміна в часі температури  $T^Q$  в пластинчастому елементіРис. 4. Зміна в часі сумарної температури в пластинчастому елементі при  $\omega = \omega_{r1}$



### Висновки

Запропонована методика дозволяє визначити температуру та об'ємну пондеромоторну силу у розглядуваному електропровідному пластинчастому сенсорі за дії однорідного зовнішнього НЕМП.

На основі цієї методики вихідні початково-крайові задачі на визначальні функції – дотичну компоненту вектора напруженості магнітного поля і температуру – зведено до задач Коші на інтегральні характеристики цих функцій. Записано розв'язки задач Коші з використанням інтегрального перетворення Лапласа у вигляді згорток функцій. Ці функції описують задані крайові умови та однорідні розв'язки задач електродинаміки та теплопровідності за однорідної нестационарної електромагнітної дії.

На основі отриманих розв'язків проведено комп'ютерний аналіз зміни в часі джоулевого тепла, пондеромоторної сили і сумарної температури за дії АМРІ на розглядуваний пластинчастий сенсор. Досліджено закономірності зміни в часі зазначених фізичних величин за частоти несучого сигналу АМРІ, що знаходиться поза околom резонансних частот електромагнітного поля, а також за першої резонансної частоти.

Запропонована методика та отримані на її основі якісні та кількісні закономірності температурно-силового режиму функціонування електропровідного пластинчастого елемента за дії АМРІ можуть бути теоретичною основою для розрахунку надійності роботи пластинчастих сенсорів та актуаторів механічних коливань за дії АМРІ, що використовуються в авіаційних та корабельних системах протиоблединення.

### Список використаної літератури

1. Подстригач Я.С., Бурак Я.И., Гачкевич А.Р., Чернявская Л.В. Термоупругость электропроводных тел. Киев: Наукова думка, 1977. 235 с.
2. Мотовиловец И.А., Козлов В.И. Термоупругость. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.
3. Грибанов В.Ф., Паничкин Н.Г. Связанные и динамические задачи термоупругости. Москва: Машиностроение, 1984. 126 с.
4. Гачкевич О.Р., Мусій Р.С., Тарлаковський Д.В. Термомеханіка неферромагнітних електропровідних тіл за дії імпульсних електромагнітних полів з модуляцією амплітуди. Львів: СПОЛОМ, 2011. 216 с.

### References

1. Podstrigach Ya.S., Burak Ya.I., Gachkevich A.R., Chernyavskaya L.V. Termouprugost elektroprovodnykh tel. Kiev: Naukova dumka, 1977. 235 s.
2. Motovilovets I.A., Kozlov V.I. Termouprugost. Kiev: Naukova dumka, 1987. 264 s.
3. Gribanov V.F., Panichkin N.G. Svyazannyye i dinamicheskie zadachi termouprugosti. Moskva: Mashinostroenie, 1984. 126 s.
4. Hachkevych O.R., Musii R.S., Tarlakovskiy D.V. Termomekhanika neferomahnitnykh elektroprovodnykh til za dii impulsnykh elektromahnitnykh poliv z moduliatsiieiu amplitudy. Lviv: SPOLOM, 2011. 216 s.

УДК 681.536.54

С. І. ОСАДЧИЙ, І. А. БЕРЕЗЮК, Д. М. ЛУЖКОВ  
Центральноукраїнський національний технічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

*Дослідження спрямовані на розробку нового методу ідентифікації моделей динаміки холодильної камери. В результаті застосування запропонованого методу визначено найменший порядок системи лінеаризованих диференціальних рівнянь, які описують динаміку холодильної камери в реальних умовах експлуатації. Встановлено, що збурення, які діють на вході зазначеного лінеаризованого об'єкту керування, належать до двовимірних стаціонарних випадкових процесів, утворених формувальним фільтром з матрицею передаточних функцій другого порядку. Визначено, що між зміною сигналу керування та реакцією об'єкта існує чисте запізнення.*

*Ключові слова* холодильна камера, передаточна функція, спектральна щільність, структурна ідентифікація, моделі динаміки, збурення, оптимальна система стабілізації

С. І. ОСАДЧИЙ, І. А. БЕРЕЗЮК, Д. М. ЛУЖКОВ  
Центральноукраїнський національний технічний університет

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ХОЛОДИЛЬНОЙ КАМЕРЫ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*Исследования направлены на разработку нового метода идентификации моделей динамики холодильной камеры по температуре воздуха и действующих возмущений. В результате применения предлагаемого метода определен наименьший порядок системы линейаризованных дифференциальных уравнений, которые описывают динамику холодильной камеры в реальных условиях эксплуатации. Установлено, что возмущения, которые действуют на входе данного линейаризованного объекта управления, представляют собой двумерные стационарные случайные процессы образованные формирующим фильтром с матрицей передаточных функций второго порядка. Установлено, что между изменением сигнала управления и реакцией объекта существует чистое запаздывание.*

*Ключевые слова:* холодильная камера, передаточная функция, спектральная плотность структурная идентификация, модели динамики, возмущения, оптимальная система стабилизации

S. I. OSADCHY, I. A. BEREZYUK, D. M. LUZSHKOV  
Central Ukrainian Technical University

### RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE REFRIGERATION CHAMBER IN REAL OPERATION CONDITIONS

*The purpose of the study is to develop a new method for identifying models of the dynamics of the refrigerating chamber for air temperature and perturbations.*

*The estimation of the structure and parameters of the models of the refrigerating chamber dynamics for air temperature and perturbations is performed in the frequency domain on the class of stable and implemented physically variable transfer functions with the use of the newest ones. Output data for the identification was obtained as a result of the application of the provisions of the applied theory of random functions to the experimental data determined as a result of monitoring the work of the refrigeration equipment of the Danfoss company in real conditions of operation in the supermarket.*

*As a result of the implementation of the stages of structural identification of the dynamics of the control object and perturbations acting during the stabilization of the air temperature in the refrigerating chamber of the supermarket, it is proved that the least order of the system of linearized differential equations of a refrigerating chamber equipped with a single thermoregulation valve, whose control signal is a change in the time of the open the valve position, and the output signal vector consists of the change in the air temperature in the chamber and the evaporator temperature change, is equal to two. Perturbations that act at the entrance of a linearized control object are two-dimensional stationary random processes formed by a molding filter with a matrix of second-order transfer functions. Verification of the identified model of dynamics has shown that this model is the result of achieving a compromise between complexity and simplicity and accuracy. It is determined*

that there is a net delay of about 164 seconds between the change of the control signal and the reaction of the object.

**Keywords:** refrigerating chamber, transfer function, spectral density, structural identification, dynamics model, perturbation, optimal stabilization system

### Постановка проблеми

Дослідження можливості підвищення ефективності холодильного устаткування з одним терморегулювальним клапаном повинно ґрунтуватися на синтезі та аналізі якості оптимальної системи стабілізації температури повітря у холодильній камері. В свою чергу рівень якості, який може бути досягнуто у оптимальній системі стабілізації, визначається динамічними властивостями об'єкта керування, збуреннями та шумами вимірювання, які виникають в реальних умовах функціонування, динамікою датчиків та виконавчих пристроїв системи, а також методом синтезу оптимального регулятора.

Досягти найвищої якості можливо, лише при наявності відповідної моделі динаміки об'єкта керування разом з виконавчим органом та датчиками. Практика створення оптимальних систем стабілізації показала наявність протиріч у вимогах до цієї моделі. З одного боку, модель повинна найбільш повно та точно характеризувати поведінку об'єкта керування у реальних умовах його функціонування, а з іншого модель повинна бути найбільш простою для подальших розрахунків.

Досягнення компромісу між зазначеними вимогами можливо за рахунок структурної ідентифікації динаміки об'єкта керування та збурень, які діють на нього, за експериментальними даними, отриманими під час пасивного експерименту в реальних умовах функціонування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні відомо багато методів пасивної ідентифікації моделей складних динамічних об'єктів керування в частотній області [1,2,11]. Необхідною умовою для застосування цих методів є відсутність взаємної кореляції збурень та сигналів. Як правило, холодильна камера працює в складі замкнутої системи стабілізації температури повітря в ній, тому гіпотеза про відсутність взаємного впливу збурень та сигналів керування в такій системі не виконується. Таким чином, виникає необхідність у створенні нового методу ідентифікації моделей динаміки такого складного динамічного об'єкта як холодильна камера.

### Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у розробці методу ідентифікації моделей динаміки холодильної камери за температурою та збурень для побудови оптимальної системи стабілізації.

Система керування температурою повітря з одним терморегулювальним вентилем (ТРВ) (рис. 1), як показано в роботі [5] складається з декількох елементів. В загальному випадку усі вони є нелінійними. Однак, у режимі стабілізації динаміку елементів зазначеної системи можливо характеризувати лінеаризованими моделями [11], якщо структура та параметри цих моделей визначені в результаті пасивної ідентифікації

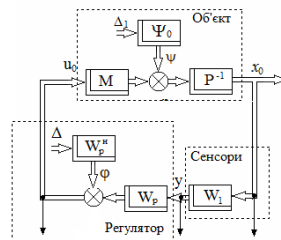


Рис. 1. Блок-схема системи стабілізації температури повітря у камері

У відповідності до цієї блок-схеми система стабілізації має два багатовимірні входи: двовимірний вектор збурень  $\psi$ , компонентами якого є центровані стаціонарні випадкові процеси відхилення температури предметів у холодильній камері від середнього значення  $\psi_1$  та відхилення температури навколо випарника від її математичного сподівання  $\psi_2$ . На другий вхід подається центрований стаціонарний випадковий шум перетворень вимірювальної інформації  $\phi$ . Його компоненти виникають в результаті комбінації дії похибок вимірювання компонентів вектору сигналів на виході об'єкту керування  $x_0$  та нелінійних спотворень у терморегулювальному клапані.

На вході об'єкта стабілізації окрім вектору збурень  $\psi$  діє сигнал або вектор сигналів керування  $u_0$ , який дорівнює відхиленням положення клапану від середнього значення. На виході об'єкта виникає вектор вихідних сигналів  $x_0$ , компоненти якого представляють відхилення температури повітря у камері від заданого значення  $x_1$  та відхилення температури холодоагенту на вигоді випарника  $x_2$ .

Динаміку лінеаризованого об'єкта стабілізації характеризує система звичайних диференціальних рівнянь у відхиленнях

$$Px_0 = Mu_0 + \psi, \quad (1)$$

де  $P$  – поліноміальна матриця розміру  $2 \times 2$  від оператора диференціювання  $s$ , яка характеризує власний рух об'єкта керування;  $M$  – поліноміальна матриця розміру  $2 \times 1$  від оператора диференціювання, яка характеризує вплив зміни сигналу керування на вектор вихідних сигналів об'єкту.

Вважається, що вектори  $u_0$ ,  $x_0$  та  $y$  можуть бути вимірними в реальних умовах функціонування холодильного обладнання, а матриця передаточних функцій сенсорів  $W_1$  визначена у технічній документації сенсорів.

В такому разі, задача дослідження динаміки холодильної камери як об'єкта керування полягає у тому, щоб за відомими записами векторів сигналів  $u_0$ ,  $x_0$  та  $y$  знайти поліноміальні матриці  $M$ ,  $P$  та дробово-раціональні матриці  $W_p$ ,  $W_p^H$ ,  $\Psi_0$ , які мають найменший можливий порядок поліномів та забезпечують прийнятне значення суми зважених дисперсій похибок ідентифікації  $J_i$

$$J_i = \langle (x_0 - x_m)' R_i (x_0 - x_m) \rangle, \quad (2)$$

де  $R_i$  – вагова додатно визначена матриця відповідного розміру;  $\langle * \rangle$  – символ математичного сподівання; індекс / – знак транспонування.

Вихідними даними для проведення досліджень є:  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  – вектори запізнень між компонентами векторів «вхід-вихід», спектральні щільності та взаємні спектральні щільності відповідних сигналів, які складають множини  $S_0$ ,  $S_1$ :

$$S_0 = \begin{Bmatrix} \tau_0 & S'_{uu} & S'_{ux} & S'_{ux} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

$$S_1 = \begin{Bmatrix} \tau_1 & S'_{uu} & S'_{uy} & S'_{uy} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

а також множина даних  $F_p$ , компонентами якої є матриця передаточних функцій регулятора у певному режимі стабілізації  $W_p$ , а також матриці передаточних функцій формувального фільтру  $W_p^H$ , який з вектору некорельованих білих шумів одиничної інтенсивності  $\Delta$  формує багатовимірний центрований стаціонарний випадковий процес  $\phi$  з заданою матрицею спектральних щільностей  $S_{\phi\phi}$ :

$$F_p = \begin{Bmatrix} W_p & W_p^H \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Таким чином задача ідентифікації формується наступним чином: необхідно за заданими множинами (3) та (5) знайти поліноміальні матриці  $P$ ,  $M$  та дробово-раціональну матрицю  $\Psi_0$  (рис. 1), які є елементами наступної множини результатів ідентифікації холодильної камери  $F_0$

$$F_0 = \{P \quad M \quad \Psi_0\}. \quad (6)$$

### Викладення основного матеріалу досліджень

Розробка методу ідентифікації лінеаризованої моделі динаміки холодильної камери та збурень за даними пасивного експерименту здійснена в результаті мінімізації функціоналу (2) у частотній області на класі стійких та реалізованих фізично варійованих передаточних функцій.

Для реалізації цієї ідеї введено наступне позначення

$$K = W_p W_1 \quad (7)$$

та здійснена перебудова структурної схеми системи стабілізації (рис. 2) до типового [3] вигляду, який представлено на рис. 2.

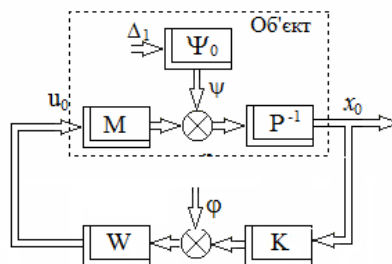


Рис. 2. Типова структурна схема системи стабілізації

Враховуючи вихідну структурну схему та введене позначення (7), матриця передаточних функцій  $W$  представляється у вигляді

$$W = E_m, \quad (8)$$

де  $E_m$  – одинична матриця розміру  $m \times m$ ;  $m$  – кількість сигналів керування на вході об'єкта.

Скориставшись ідеями, викладеними у монографіях [1, 3, 10] для синтезу оптимальних систем стабілізації введені до розгляду два додаткові вектори:

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де компонента  $x_1 = \varphi$ , та

$$\psi_0 = \begin{bmatrix} \Psi_0 & O_n \\ O_n & E_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \varphi \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де  $O_n$  – нульова матриця розміру  $n \times n$ ;  $n$  – розмір вектору  $x_0$ . В такому разі динаміка системи стабілізації (рис. 2) описується системою звичайних диференціальних рівнянь, яка у перетвореннях Лапласа при нульових початкових умовах представляється як

$$P_0 x = M_0 u_0 + \psi_0; \quad (11)$$

$$u = W(K \quad E_m)x = W_0 x; \quad (12)$$

де  $P_0, M_0$  – поліноміальні матриці вигляду

$$P_0 = \begin{bmatrix} P & O_{n \times m} \\ O_{m \times n} & E_m \end{bmatrix}, \quad M_0 = \begin{bmatrix} M \\ O_m \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$W_0$  – дробово-раціональна матриця відповідного розміру.

З літературних джерел [1, 2, 10] відомо, що вектор (9) зв'язаний з розширеним вектором збурень (10) матрицею передаточних функцій  $F_x$ , яка дорівнює

$$F_x = (P_0 - M_0 W_0)^{-1}. \quad (14)$$

Підстановка до виразу (14) матриць (13) та обернення отриманої матриці за формулою Фробеніуса [4] дозволили отримати наступний результат

$$F_x = \begin{bmatrix} F_1^{-1} & F_1^{-1} M W \\ 0 & E_m \end{bmatrix}, \quad (15)$$

де  $F_1$  – дробово-раціональна матриця, яка визначається рівнянням

$$F_1 = P - M W K. \quad (16)$$

Якщо матриці  $P, M$  та  $\Psi_0$  знайдені в результаті ідентифікації, то вектор сигналів на виході моделі системи стабілізації  $x_m$  зв'язаний з вектором «білого» шуму одиничної інтенсивності  $\Delta_1$  співвідношенням

$$x_m = \Phi z, \quad (17)$$

де  $\Phi$  – блочна матриця рядок

$$\Phi = [\Phi_{11} \quad \Phi_{12}] = [F_1^{-1} M W \quad F_1^{-1} \Psi_0], \quad (18)$$

$z$  – розширений вектор зовнішніх впливів

$$z = \begin{bmatrix} \varphi \\ \Delta_1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Таким чином, вектор похибок ідентифікації  $\varepsilon$  з урахуванням співвідношень (2) та (17) дорівнює

$$\varepsilon = x_0 - \Phi z, \quad (20)$$

а показник якості ідентифікації (2) у частотній області представляється як

$$J_i = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr}(S'_{\varepsilon\varepsilon} R) ds, \quad (21)$$

де  $j$  – комплексна одиниця,  $\text{tr}$  – слід матриці;  $S'_{\varepsilon\varepsilon}$  – транспонована матриця спектральних щільностей вектору похибок ідентифікації (20).

Застосування теореми Вінера-Хінчіна у векторній формі [3] до вектору  $\varepsilon$  з урахуванням виразів (18)-(20) за умови відсутності взаємного впливу векторів  $\varphi$  та  $\Delta_1$  дозволило знайти у явному вигляді зв'язок між матрицями  $S'_{\varepsilon\varepsilon}$  та  $\Phi$

$$S'_{\varepsilon\varepsilon} = S'_{xx} - S'_{zx} \Phi^* - \Phi S'_{xz} + \Phi S'_{zz} \Phi^*, \quad (22)$$

де  $S'_{zx}, S'_{xz}$  – транспоновані матриці взаємних спектральних щільностей між векторами  $z$  та  $x_0$

$$S'_{zx} = \begin{bmatrix} S'_{\varphi x} & S'_{\Delta x} \end{bmatrix}; \quad (23)$$

$S'_{zz}$  – матриця спектральних щільностей вектору  $z$ , яка за теоремою Вінера-Хінчіна дорівнює

$$S'_{zz} = \begin{bmatrix} S'_{\varphi\varphi} & O_{m \times n} \\ O_{n \times m} & E_2 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Транспонована матриця взаємних спектральних щільностей між вектором  $\varphi$  та вектором  $x_0$  визначена зі схеми рис. 2. з урахуванням виразу (8) у вигляді

$$S'_{\varphi x} = S'_{ux} - S'_{xx} K^*, \quad (25)$$

оскільки

$$W^{-1} u_0 = K x_0 + \varphi.$$

Для розрахунку транспонованої матриці взаємних спектральних щільностей  $S'_{\Delta x}$  розглянуто рівняння зв'язку, отримане застосуванням теореми Вінера-Хінчіна до виразу (17) з урахуванням незалежності векторів  $\varphi$  та  $\Delta_1$

$$S'_{xx} = S'_{\varphi x} (S'_{\varphi\varphi})^{-1} S'_{x\varphi} + S'_{\Delta x} (S'_{\Delta\Delta})^{-1} S'_{x\Delta}. \quad (26)$$

Оскільки вектор  $\Delta_1$  є вектором білих шумів одиничної інтенсивності, а між матрицями взаємних спектральних щільностей, як відомо з [10], виконується умова

$$S'_{\Delta x} = S'_{x\Delta*},$$

то пошук матриці  $S'_{\Delta x}$  доцільно здійснити в результаті вінеровської факторизації ліворуч [10] правої частини наступного рівняння

$$S'_{\Delta x} S'_{x\Delta} = S'_{xx} - (S'_{ux} - S'_{xx} K^*) (S'_{\varphi\varphi})^{-1} (S'_{xu} - K S'_{xx}). \quad (27)$$

Таким чином доведено, що критерій якості ідентифікації (21) є функціоналом від блочної матриці варійованих передаточних функцій  $\Phi$

$$J_i = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} (S'_{xx} - S'_{zx} \Phi^* - \Phi S'_{xz} + \Phi S'_{zz} \Phi^*) R ds \quad (28)$$

а задача ідентифікації зведена до пошуку реалізованої фізично матриці  $\Phi$ , яка мінімізує функціонал (28).

Для мінімізації зазначеного функціоналу використано метод Вінера-Колмогорова у відповідності з яким знайдена наступна його перша варіація

$$\delta J_i = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left[ (R \Phi S'_{zz} - R S'_{zx}) \delta \Phi^* + \delta \Phi (S'_{zz} \Phi^* R - S'_{xz} R) \right] ds. \quad (29)$$

Якщо за аналогією з джерелами [1, 4] здійснити факторизацію матриць  $S'_{zz}$  та  $R$  та знайти фактори  $D$  та  $\Gamma$  зі стійкими особливостями визначників, які відповідають рівнянням

$$D D^* = S'_{zz}; \quad (30)$$

$$\Gamma^* \Gamma = R; \quad (31)$$

а також виконати сепарацію (розщеплення) [1, 4] дробово-раціональної матриці  $T$

$$T = T_0 + T_+ + T_- = -\Gamma S'_{zx} D_*^{-1}, \quad (32)$$

то шукана матриця  $\Phi$  визначається наступним добутком

$$\Phi = -\Gamma^{-1} (T_0 + T_+) D^{-1}. \quad (33)$$

В результаті видалення спільних полюсів в блоках  $\Phi_{11}$  та  $\Phi_{12}$  було виділено дробово-раціональну матрицю мінімального порядку  $F_1$ . При відомій  $F_1$  ідентифікацію завершує розрахунок матриць  $M$ ,  $P$  та  $\Psi_0$  з рівнянь (18) та (16)

$$M = F_1 \Phi_{11} W^{-1}; \quad (34)$$

$$\Psi_0 = F_1 \Phi_{12}; \quad (35)$$

$$P = F_1 - M W K. \quad (36)$$

Таким чином, визначені рівняння, які дозволяють оцінити моделі динаміки об'єкта керування, який функціонує у системі стабілізації.

Визначення матриць  $F_1$  та  $\Psi_0$  виконується на основі матриці  $\Phi_{12}$ . Для його виконання використано підхід, викладений у [8]. У відповідності до цього підходу нормалізовані взаємно прості фактори  $F_1$  та  $\Psi_0$  знаходяться з рівнянь



$$F_1 = \begin{bmatrix} A + H_0 C & B + H_0 D \\ R_0^{-\frac{1}{2}} C & R_0^{-\frac{1}{2}} D \end{bmatrix}; \quad (37)$$

$$\Psi_0 = \begin{bmatrix} A + H_0 C & H_0 \\ R_0^{-\frac{1}{2}} C & R_0^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix}; \quad (38)$$

де  $A, B, C, D$  – числові матриці мінімального представлення матриці  $\Phi_{12}$  у просторі станів;  $R_0$  – числова матриця розрахована за рівнянням

$$R_0 = E_m + DD';$$

$H_0$  числова матриця вигляду

$$H_0 = -(BD' + ZC')R_0^{-1};$$

$Z$  – єдиний додатно визначений розв'язок узагальненого матричного алгебраїчного рівняння Ріккати

$$(A - BS^{-1}D'C)'Z + Z(A - BS^{-1}D'C) - ZC'R_0^{-1}CZ + BS^{-1}B' = 0,$$

а матриця  $S$  повинна бути розрахована як

$$S = E_n + D'D.$$

Ідентифікація моделей динаміки холодильної камери за температурою повітря та збурень, які діють на систему стабілізації в умовах супермаркету, здійснене за множинами даних  $S_0$  та  $F_p$ , які визначені на попередніх етапах дослідження, з допомогою алгоритму ідентифікації, формалізованого у вигляді залежностей (25), (27), (30)-(36).

Матриця  $M$  знайдена з рівняння (34) має вигляд

$$M = \begin{bmatrix} -1.76 \cdot 10^{-9}(s - 0.44)(s - 0.0067) \\ 8.51 \cdot 10^{-9}(s + 0.002)(s + 0.1) \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Розв'язок рівняння (36) дозволив визначити матрицю  $P$  як

$$P = \begin{bmatrix} 5.69 \cdot 10^{-7} & 0 \\ 0 & 4.51 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} (s + 0.0012)(s + 0.136). \quad (40)$$

$$\Psi_0 = \begin{bmatrix} 2.17(s + 6.2 \cdot 10^{-4}) - 0.027(s + 6.2 \cdot 10^{-4}) \\ 0 & 0.0032(s + 7 \cdot 10^{-4}) \end{bmatrix} \frac{1}{s^2 + 6.8 \cdot 10^{-4}s + 8.4 \cdot 10^{-7}}. \quad (41)$$

Таким чином здійснене оцінювання структури та параметрів моделей динаміки холодильної камери за температурою повітря та збурень, які діють під час стабілізації.

Верифікація моделі динаміки об'єкта керування показала достатньо високу точність визначення моделі об'єкта керування.

Дослідження динаміки холодильної камери з одним терморегулювальним вентилем, яке виконане методом ідентифікації, дозволило розробити лінеаризовані моделі усіх елементів системи керування в режимі стабілізації та скласти її уточнену структурну схему.

### Висновки

В результаті структурної ідентифікації моделей динаміки холодильної камери та збурень, що діють під час стабілізації температури повітря у ній доведено, що найменший порядок системи лінеаризованих диференціальних рівнянь цієї камери, оснащеної одним ТРВ, дорівнює двом. Зазначене твердження виконується якщо сигналом керування є зміна часу відчиненого положення ТРВ, а вектор вихідних сигналів складається зі зміни температури повітря у камері та зміни температури холодоагенту. Збурення, які діють на вході лінеаризованого об'єкта керування, належать до двовимірних стаціонарних випадкових процесів, утворених формувальним фільтром з матрицею передаточних функцій другого порядку. Між зміною сигналу керування та реакцією об'єкта існує чисте запізнення близько 164 секунд.

### Список використаної літератури

1. Азарсков В.Н., Блохин Л.Н., Житецкий Л.С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: монография / под ред. Л.Н. Блохина. Киев: Книжное изд-во НАУ, 2006. 400 с.
2. Блохин Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: підручник. Київ: НАУ, 2003. 208 с.
3. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. Киев: Техніка, 1982. 144 с.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. Москва: Наука, 1988. 548 с.

5. Осадчий С.І., Лужков Д.М. Шляхи модернізації систем автоматики холодильного устаткування з одним терморегулювальним вентилем. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. Кіровоград, 2017. Вип. 30. С. 160-167.
6. Ньютон Дж. К., Гулд Л.А., Кайзер Дж. Ф. Теория линейных следящих систем / под ред. А.М. Летова. Москва: Наука, 1961. 407 с.
7. Синтез оптимальных систем с обратной связью/ В. Б. Ларин, К. И. Науменко, В.Ц. Сунцев. Київ: Наук. думка, 1973. 151 с.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. Москва: МГТУ им. Баумана, 2004. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. 614с.
9. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва: Наука, ФМ, 1966. 623с.
10. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления/ Ф.А. Алиев, В.Б. Ларин, К.И. Науменко, В.Н. Сунцев. Киев: Наук. думка, 1978. 327 с.
11. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / под ред. Н. С. Райбмана. Москва: Мир, 1975. 684 с.

#### References

1. Azarskov V.N., Blokhyn L.N., Zhytetskyi L.S. Metodolohiya konstruyrovanyia optymalnykh system stokhastycheskoi stabylyzatsyy: monohrafiya / pod red. L.N. Blokhyna. Kyev: Knyzhnoe yzd-vo NAU, 2006. 400 s.
2. Blokhyn L.M., Burychenko M.Iu. Statystychna dynamika system upravlinnia: pidruchnyk. Kyiv: NAU, 2003. 208 s.
3. Blokhyn L.N. Optymalnye systemy stabylyzatsyy. Kyev: Tekhnika, 1982. 144 s.
4. Hantmakher F.R. Teoryia matryts. Moskva: Nauka, 1988. 548 s.
5. Osadchyi S.I., Luzhkov D.M. Shliakhy modernizatsii system avtomatyky kholodylnoho ustatkuvannia z odnym termorehuliuvalnym ventylem. Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia». Kirovohrad, 2017. Vyp. 30. S. 160-167.
6. Niuton Dzh. K., Huld L.A., Kaizer Dzh. F. Teoryia lyneinykh slediashchykh system / pod red. A.M. Letova. Moskva: Nauka, 1961. 407 s.
7. Syntez optymalnykh system s obratnoi sviazii/ V. B. Laryn, K. Y. Naumenko, V .Ts. Suntsev. Kyiv: Nauk. dumka, 1973. 151 s.
8. Metody klassycheskoi y sovremennoi teoryy avtomatycheskoho upravleniya: v 5 t. / pod red. K.A. Pupkova, N.D. Ehupova. Moskva: MHTU ym. Baumana, 2004. T.3: Syntez rehulatorov system avtomatycheskoho upravleniya. 614s.
9. Feldbaum A.A. Osnovy teoryy optymalnykh avtomatycheskykh system. Moskva: Nauka, FM, 1966. 623s.
10. Optymyzatsiia lyneinykh ynvaryantnykh vo vremeny system upravleniya/ F.A. Alyev, V.B. Laryn, K.Y. Naumenko, V.N. Suntsev. Kyev: Nauk. dumka, 1978. 327 s.
11. Eykhhoff P. Osnovy ydentyfikatsyy system upravleniya. Otsenyvanye parametrov y sostoianiya / pod red. N. S. Raibmana. Moskva: Myr, 1975. 684 s.

УДК 514.18

С.Ф. ПИЛИПАКА, І.Ю. ГРИЩЕНКО, В.М. БАБКА  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Т.А. КРЕСАН, Т.П. ФЕДОРІНА  
Ніжинський агротехнічний інститут НУБіП України

### РУХ ЧАСТИНКИ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ВЛАСНОЇ ВАГИ ПО КРИВІЙ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРА

*Розглянуто рух частинки під дією сили власної ваги по циліндричній поверхні із горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних. Траєкторією такого руху є крива поперечного перерізу циліндра. Складено диференціальне рівняння руху частинки. Розглянута обернена задача знаходження кривої поперечного перерізу циліндра за заданим законом руху частинки. Задача розв'язується із врахуванням сили тертя частинки по поверхні. Розглянуто окремі випадки, коли диференціальне рівняння має аналітичний розв'язок. Зокрема, це стосується знаходження кривої, яка забезпечує сталу швидкість руху частинки. Для інших випадків розв'язання диференціальних рівнянь потребує застосування чисельних методів. Розглянуто приклади, побудовано знайдені криві поперечного перерізу циліндра.*

*Ключові слова:* циліндрична поверхня, крива поперечного перерізу, рух частинки, сила ваги, траєкторія, диференціальне рівняння.

С.Ф. ПИЛИПАКА, И.Ю. ГРИЩЕНКО, В.Н. БАБКА  
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
Т.А. КРЕСАН, Т.П. ФЕДОРІНА  
Нежинский агротехнический институт НУБиП Украины

### ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ СОБСТВЕННОГО ВЕСА ПО КРИВОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

*Рассмотрено движение частицы под действием силы собственного веса по цилиндрической поверхности с горизонтальным расположением прямолинейных образующих. Траекторией такого движения является кривая поперечного сечения цилиндра. Составлено дифференциальное уравнение движения частицы. Рассмотрена обратная задача нахождения кривой поперечного сечения цилиндра по заданному закону движения частицы. Задача решается с учетом силы трения частицы по поверхности. Рассмотрены отдельные случаи, когда дифференциальное уравнение имеет аналитическое решение. В частности, это касается нахождения кривой, которая обеспечивает постоянную скорость движения частицы. Для других случаев решение дифференциальных уравнений требует применения численных методов. Рассмотрены примеры, построены найденные кривые поперечного сечения цилиндра.*

*Ключевые слова:* цилиндрическая поверхность, кривая поперечного сечения, движение частицы, сила веса, траектория, дифференциальное уравнение.

S.F. PYLYPAKA, I.YU. GRISCHENKO, V.M. BABKA  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
T.F. KRESAN, T.P. FEDORINA  
IS NULES of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute"

### PARTICLE MOTION UNDER THE EFFECT OF THE OWN WEIGHT BY A CURVE OF A CROSS- SECTION OF A HORIZONTAL CYLINDER

*The movement of a particle under the action of the force of its own weight along a cylindrical surface with a horizontal arrangement of straight lines is considered. The trajectory of this movement is the cross-section curve of the cylinder. If the cylinder degenerates into an inclined plane, then the trajectory of movement is a straight line - the line of maximum inclination of the plane. Depending on the angle of inclination of the plane and the angle of friction of the particle along the plane, the motion of the particle can be uniform, uniformly accelerated, or equally slow. The article discusses the possibility of such a movement for a cylindrical surface. A differential equation of particle motion along a curve, which is a section of a cylinder, has been compiled. Based on the condition that the acceleration is constant or equal to zero, the problem of finding the equation of the curve is solved. The problem is solved in two stages. The first stage is the relationship between the variable angle of inclination of the tangent to the curve and its curvature. For this purpose, a differential equation of the particle motion in projections onto the orths of the natural trihedron is compiled. At the second stage, on the basis of the equation found, parametric equations of the curve are sought. Separate cases are considered when the differential equation has an analytical solution. In particular, this concerns finding a curve that ensures a constant velocity of a particle. We also found parametric equations of the curve in the final form*

for the case when the velocity of the particle has a sinusoidal character. For other cases, solving differential equations requires the use of numerical methods. Examples are considered, the found curves of cross section of the cylinder for the uniformly accelerated motion are constructed. It is shown that with a small amount of acceleration, the shape of the curve approaches a curve that provides a constant speed. In the presence or absence of an acceleration, we have branches approaching straight lines extending to infinity. The angle of inclination of these branches corresponds to the angle of inclination of the plane, which ensures a similar law of particle motion.

Keywords: cylindrical surface, cross section curve, particle motion, weight force, trajectory, differential equation.

### Постановка проблеми

Під час робочого процесу у деяких машинах технологічний матеріал контактує із поверхнями робочих органів. В процесі взаємодії матеріал рухається по поверхні по певній траєкторії. Рух може бути вимушеним, зумовленим дією зовнішніх чинників, а також може відбуватися під дією сили власної ваги частинки матеріалу. Другою прикладеною силою є сила тертя, спричинена шорсткістю поверхні. Нехтуючи розмірами окремого елемента матеріалу, прийнемо його за матеріальну частинку.

Відомо, що по похилій площині частинка під дією сили власної ваги рухається прямолінійно вздовж лінії найбільшого нахилу. Цей рух може відбуватися із сталою швидкістю, коли кут нахилу площини дорівнює куту тертя, і рівноприскорено, коли він більший від кута тертя. Постає питання: чи існують циліндричні поверхні із горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних, здатні забезпечити аналогічний рух частинки? Рух частинки по циліндрі будемо розглядати як рух по кривій його поперечного перерізу. Таким чином, просторова задача зводиться до плоскої, а знаходження форми циліндра – до відшукування кривої його поперечного перерізу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Рух частинок по поверхнях робочих органів сільськогосподарських машин досліджували академіки В.П. Горячкін [1], П.М. Василенко [2], П.М. Заїка [3]. Рух частинки по внутрішній поверхні похилого циліндра під дією сили власної ваги розглянуто в праці [4]. Був період, коли для розділення окремих фракцій зернових сумішей застосовували гвинтові поверхні. Теоретичний опис такого процесу в циліндричній системі координат наведено в праці [5]. Рухові частинок по гвинтових лінійчатих поверхнях присвячено праці [6 – 7]. В праці [8] знайдені криві перерізів горизонтальних циліндрів, які забезпечують сталий тиск частинки на поверхню за умови, що їх швидкість руху по кривій перерізу є сталою. Розглянуто випадки, коли сила тиску більша або менша ваги частинки. Якщо сила тиску менша ваги частинки, то знайдені криві характеризуються тим, що мають вітки, які віддаляються в нескінченність і при цьому асимптотично наближаються до прямих ліній. Це означає, що циліндрична поверхня плавно переходить у площину.

### Мета дослідження

Розробити аналітичний опис руху частинки по кривій поперечного перерізу горизонтального циліндра під дією сили власної ваги, який міг би забезпечити задані кінематичні характеристики такого руху.

### Викладення основного матеріалу досліджень

Розглянемо рух частинки по плоскій кривій - лінії поперечного перерізу циліндричної поверхні з горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних. Якщо початкова швидкість  $V$  в точці  $A$  відсутня, або ж її напрям збігається із напрямом дотичної до кривої, то частинка рухатиметься по плоскій кривій перерізу (рис. 1,а). При русі точки по кривій обов'язково виникає прискорення  $w$ , навіть якщо швидкість  $V$  є сталою. Воно складається з двох складових: одна складова характеризує швидкість зміни вектора швидкості за величиною, проекціюється на орт  $\bar{\tau}$  дотичної і носить назву тангенціального прискорення. Його величина визначається диференціюванням швидкості  $V$  за часом  $t$ :  $w_{\tau}=dV/dt$ . Інша складова - нормальне або доцентрове прискорення характеризує швидкість зміни вектора швидкості за напрямком і проекціюється на орт  $\bar{n}$  головної нормалі. Його величина визначається добутком кривини  $k$  на квадрат швидкості  $V$ :  $w_n=V^2k$ . При русі частинки по кривій положення супровідного тригранника характеризується змінним кутом  $\alpha$ , який складає орт дотичної  $\bar{\tau}$  із віссю  $OX$  нерухомої системи координат (рис. 1,б).

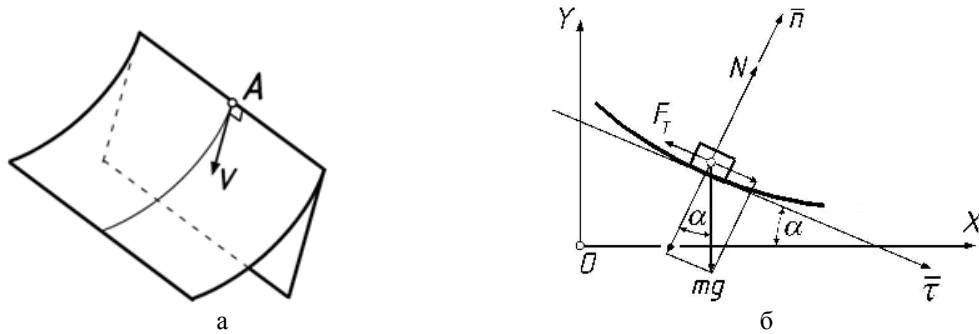


Рис. 1. До руху частинки по кривій поперечного перерізу горизонтального циліндра:

а) зображення траєкторії руху частинки на поверхні циліндра;

б) супровідний тригранник траєкторії (біномаль  $\vec{b}$  проєкціюється в точку) із розкладеними на його орти діючими силами

Диференціальні рівняння руху частинки в проєкціях на орти супровідного тригранника згідно другого закону Ньютона запишуться:

$$m \frac{dV}{dt} = F_\tau; \quad mV^2 k = F_n, \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки;

$F_\tau$  і  $F_n$  – проєкції прикладених до частинки сил.

Такими силами є: сила ваги  $mg$  ( $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ), спрямована вниз; реакція  $N$  поверхні, спрямована вздовж головної нормалі; сила тертя  $F_T$ , спрямована в протилежну сторону напрямку руху частинки (рис. 1,б). Дві останні сили збігаються із ортами тригранника і не змінюють свого напрямку в системі тригранника. Силу ваги потрібно розкласти на орти тригранника через кут  $\alpha$ . Із врахуванням цього рівняння (1) приймають вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} = mg \sin \alpha - F_T; \quad mV^2 k = N - mg \cos \alpha. \quad (2)$$

Сила тертя  $F_T$  прямо пропорційна силі реакції  $N$ , де коефіцієнтом пропорційності служить коефіцієнт тертя  $f$ :  $F_T = fN$ . Із другого рівняння (2) знаходимо:  $N = mg \cos \alpha + mV^2 k$ . Отже, вираз для сили тертя запишеться:  $F_T = fm(g \cos \alpha + V^2 k)$ . Після підстановки цього виразу у перше рівняння (2) і скорочення на масу  $m$  отримаємо диференціальне рівняння руху частинки по кривій:

$$\frac{dV}{dt} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha) - fV^2 k. \quad (3)$$

В такому вигляді рівняння (3) неможливо розв'язати, оскільки змінні величини  $t$ ,  $V$ ,  $\alpha$ ,  $k$  не приведені у функціональну залежність до однієї незалежної змінної. Важливою диференціальною характеристикою кривої є її кривина  $k$  і визначається, як швидкість зміни кута  $\alpha$  від довжини дуги  $s$ :  $k = d\alpha/ds$ . Розглянемо два варіанти приведення рівняння (3) до спільної незалежної змінної.

*Варіант 1. Незалежною змінною є довжина дуги  $s$  кривої (пройденого шляху).*

У цьому випадку швидкість  $V$  є функцією довжини дуги  $s$ , тобто  $V = V(s)$ . Здійснимо наступне перетворення:  $dV/dt = dV/ds \cdot ds/dt = V \cdot dV/ds$ . Підставимо знайдений вираз прискорення  $dV/dt = V \cdot dV/ds$  і кривини  $k = d\alpha/ds$  у рівняння (3) і після перетворень отримаємо:

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{g}{V^2 f} (\sin \alpha - f \cos \alpha) - \frac{1}{Vf} \frac{dV}{ds}. \quad (4)$$

До рівняння (4) входить дві невідомі залежності:  $V = V(s)$  і  $\alpha = \alpha(s)$ . Щоб його розв'язати, потрібно одну із функцій задати, тобто задати закономірність зміни швидкості від довжини дуги, або ж форму кривої. Зокрема, при  $\alpha = \text{const}$ , тобто для прямої лінії, ліва частина рівняння перетворюється в нуль. Рівняння (4) в цьому випадку можна записати у вигляді:

$$V \frac{dV}{ds} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (5)$$

Диференціальне рівняння (5) описує рух частинки по площині, нахиленій під кутом  $\alpha = \text{const}$  до горизонтальної площини. Його ліва частина є прискоренням. Якщо  $V = \text{const}$ , то  $\sin \alpha - f \cos \alpha = 0$  і  $f = \text{tg} \alpha$ . Таким чином, ми отримали відомий результат: частинка буде рухатися по похилій площині зі сталою швидкістю в тому випадку, коли вона нахилена під кутом тертя до горизонтальної площини. Можливий ще один варіант, коли прискорення  $dV/dt = V \cdot dV/ds = w = \text{const}$ , тобто прискорення  $w$  є сталим. Тоді рівняння (5) набуває вигляду:

$$w = g(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (6)$$

Якщо  $g(\sin \alpha - f \cos \alpha) > 0$ , тобто прискорення  $w > 0$ , то рух частинки буде рівноприскореним. Для цього потрібно, щоб кут нахилу площини був більшим від кута тертя, тобто потрібно виконання умови



$\alpha > \arctg f$ . Якщо  $\alpha < \arctg f$ , тобто кут нахилу площини буде менший кута тертя, то рух частинки буде неможливим або рівносповільненим до зупинки при наявності початкової швидкості  $V_0$ .

*Варіант 2. Незалежною змінною є кут  $\alpha$  нахилу орта дотичної до горизонтальної прямої.*

У цьому випадку швидкість  $V$  є функцією кута  $\alpha$ , тобто  $V = V(\alpha)$ . Кривину  $k$  запишемо через обернену величину  $\rho$ :  $\rho = 1/k = ds/d\alpha$ . Здійснимо наступне перетворення:  $dV/dt = dV/d\alpha \cdot d\alpha/dt = \omega \cdot dV/d\alpha$ , де  $\omega$  – кутова швидкість повороту дотичної до кривої. Її можна записати через швидкість руху частинки і кривину кривої наступним чином:  $\omega = d\alpha/dt = d\alpha/ds \cdot ds/dt = V \cdot d\alpha/ds = V/\rho$ . Отже, прискорення в цьому випадку запишеться:  $dV/dt = V \cdot V'/\rho$ . Із врахуванням цього рівняння (3) запишеться:

$$\frac{VV'}{\rho} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha) - \frac{fV^2}{\rho}. \quad (7)$$

Розв'язавши (7) відносно  $\rho = ds/d\alpha$ , отримаємо:

$$\frac{ds}{d\alpha} = \frac{V(V' + fV)}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}, \quad (8)$$

де швидкість  $V$  є функцією кута  $\alpha$  і  $V' = dV/d\alpha$ .

Розглянемо приклад. Нехай  $V = \text{const}$ . Диференціальне рівняння (8) спрощується і набуває вигляду:

$$\rho = \frac{ds}{d\alpha} = \frac{fV^2}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}. \quad (9)$$

Залежність  $\rho = \rho(\alpha)$  називається внутрішнім рівнянням кривої. Це рівняння не прив'язане до системи координат. Щоб перейти до координатного запису у вигляді параметричних рівнянь, потрібно проінтегрувати наступні вирази:

$$x = \int \rho \cos \alpha d\alpha; \quad y = \int \rho \sin \alpha d\alpha. \quad (10)$$

Підставивши (9) у (10), після інтегрування отримаємо:

$$\begin{aligned} x &= \frac{fV^2}{g} \int \frac{\cos \alpha d\alpha}{\sin \alpha - f \cos \alpha} = -\frac{fV^2}{g(1+f^2)} [\ln(f \cos \alpha - \sin \alpha) - f\alpha]; \\ y &= \frac{fV^2}{g} \int \frac{\sin \alpha d\alpha}{\sin \alpha - f \cos \alpha} = -\frac{fV^2}{g(1+f^2)} [f \ln(f \cos \alpha - \sin \alpha) + \alpha]. \end{aligned} \quad (11)$$

За рівняннями (11) на рис. 2 побудовано криві при різних значеннях швидкості  $V$  і коефіцієнта тертя  $f$ . Вітки кривої прямують у нескінченність, асимптотично наближаючись до прямої лінії. Можна припустити, що прямолінійні ділянки віток нахилені під кутом тертя  $\alpha_0 = \arctg f$  до горизонтальної прямої. До рівнянь (11) входить вираз  $\ln(f \cos \alpha - \sin \alpha)$ . Знайдемо границю цього виразу при прямуванні кута  $\alpha$  до кута тертя:

$$\lim_{\alpha \rightarrow \arctg f} \ln(f \cos \alpha - \sin \alpha) = -\infty. \quad (12)$$

Отже, наше припущення правильне. Криві на рис. 2 розбиті на дві ділянки точкою  $A$ . Якщо надати матеріальній частинці в точці  $A$  початкову швидкість  $V$ , спрямовану вліво, то частинка буде рухатися із цією швидкістю по опуклій стороні кривої, яка з часом все більше наближається до прямої, нахиленої до горизонту під кутом тертя. Якщо ж в точці  $A$  надати частинці початкову швидкість  $V$ , спрямовану вправо, то вона теж буде рухатися далі із цією швидкістю по кривій, яка з часом наближатиметься до прямої, але вже по увігнутій стороні. В цьому випадку частину дуги можна вважати кожухом, який змінює напрям руху частинки під час вільного польоту. Якби не було кожуха, то частинка рухалася б по параболі і з прискоренням (без врахування опору середовища). Кожух гасить прискорення за рахунок тертя і зберігає швидкість постійною. Форма кривої перерізу циліндра залежить від заданої швидкості  $V$  руху частинки на відміну від похилої площини.



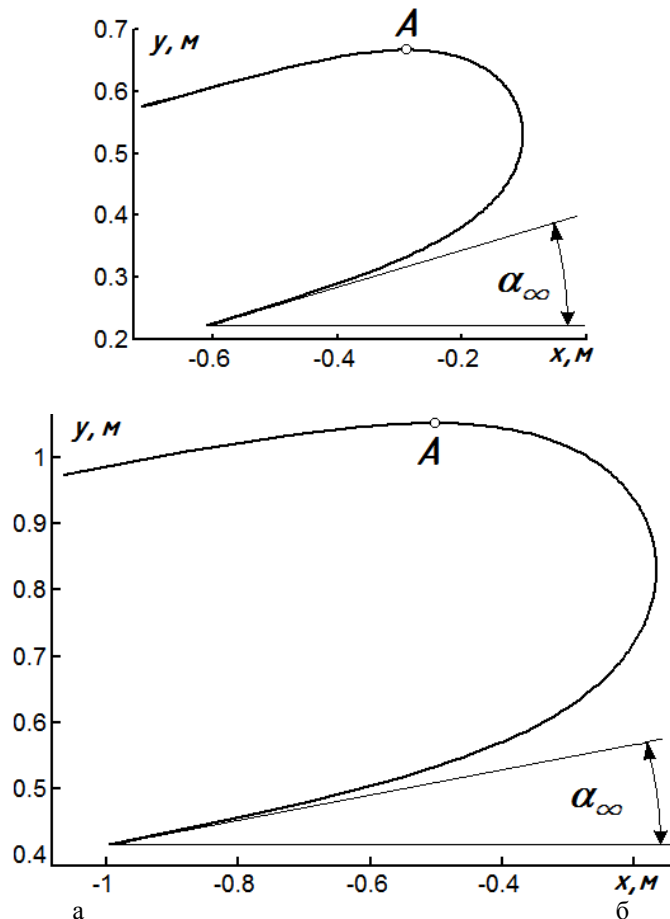


Рис. 2. Криві поперечного перерізу циліндра, що забезпечують сталу швидкість руху частинки по них під дією сили власної ваги:  
а)  $V=2$  м/с,  $f=0,3$ ; б)  $V=3$  м/с,  $f=0,2$

Знайдемо форму поперечного перерізу циліндра, який забезпечить рівноприскорений рух частинки по ньому під дією сили власної ваги, тобто із сталим прискоренням  $w$ . Для знаходження параметричних рівнянь кривої скористаємося диференціальним рівнянням (4). До нього входить вираз швидкості  $V$  і її похідної  $V'$  по змінній  $s$ . Запишемо раніше знайдену залежність:  $dV/dt = V \cdot dV/ds = w$ . Можна записати:  $V \cdot dV = w \cdot ds$ . Проінтегрувавши обидві частини цього рівняння, одержимо:  $V = \sqrt{2ws}$ , звідки  $dV/ds = w/\sqrt{2ws}$ . Підставимо отримані вирази у (4) і після спрощень одержимо:

$$k = \frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{2fws} [g(\sin \alpha - f \cos \alpha) - w]. \quad (13)$$

Залежність  $k=k(s)$  є внутрішнім рівнянням кривої, однак в даному випадку ця залежність є диференціальним рівнянням. У нього є аналітичний розв'язок, однак ми не будемо його наводити, оскільки в подальшому необхідно шукати параметричні рівняння кривої інтегруванням наступних виразів:

$$x = \int \cos \alpha \, ds; \quad y = \int \sin \alpha \, ds. \quad (14)$$

Знайшовши із (13) залежність  $\alpha=\alpha(s)$  і підставивши її в (14) ми отримуємо вирази, які неможливо проінтегрувати. Таким чином, при наявності внутрішнього рівняння  $\alpha=\alpha(s)$  кривої в аналітичному вигляді параметричні рівняння в такому ж вигляді отримати не вдається. Тому побудову кривої здійснюємо чисельними методами. На рис. 3 побудовано криві для  $f=0,3$  і різних значень прискорення  $w$ . Оскільки криві розташовані опуклістю вгору, то для отримання вірного результату кривину  $k$  в рівнянні (13) при чисельних методах обчислень потрібно задавати від'ємною.

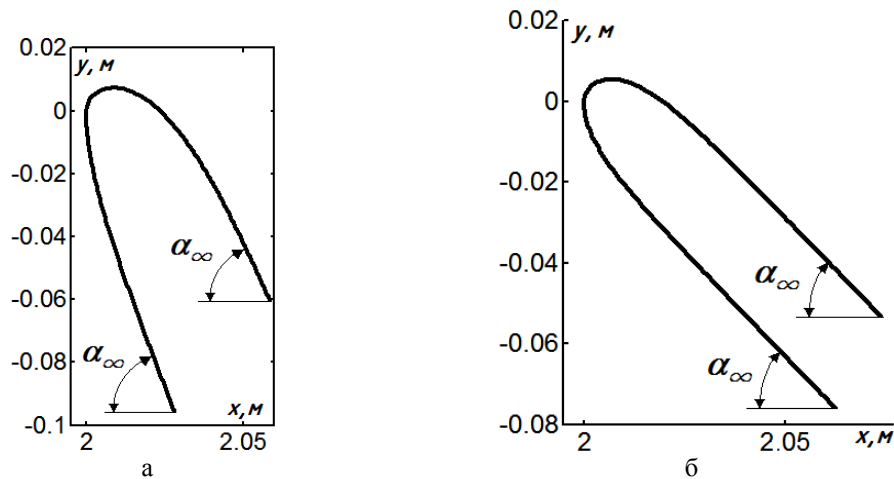


Рис. 3. Криві поперечного перерізу циліндра, що забезпечують рівноприскорений рух частинки по них під дією сили власної ваги:  
а)  $f=0,3$ ,  $w=8 \text{ м/с}^2$ ; б)  $f=0,3$ ,  $w=5 \text{ м/с}^2$

При малих значеннях прискорення  $w$  крива (13) наближається до кривої, яка забезпечує сталу швидкість руху частинки по ній. Максимальне значення прискорення  $w$ , яке ми можемо задати, дорівнює прискоренню вільного падіння  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ . При цьому значенні ми отримуємо вертикальну пряму, тобто частинка вільно падає і вплив прямої на це падіння відсутній. Як видно із рис.3, отримані криві подібні до тих, які забезпечують сталу швидкість руху. Якщо при сталій швидкості руху кут  $\alpha_\infty$  дорівнював куту тертя, тобто  $\alpha_\infty = \arctg f$ , то для рівноприскореного руху частинки цей кут має бути більший і залежний від величини прискорення  $w$ . Для похилої площини ця залежність наведена в (6). Очевидно, що вона повинна виконуватися і для віток кривої рівноприскореного руху, які прямують в нескінченність і асимптотично наближаються до прямої. На рис. 4 побудовані графіки зміни кута  $\alpha$  при побудові кривих (рис. 3) чисельними методами. Із них видно, що кут  $\alpha$  наближається до сталого значення  $\alpha_\infty$ , яке відповідає прямолінійній ділянці кривих (рис. 3). Неважко переконатися, що значення цих кутів повністю узгоджуються із формулою (6).

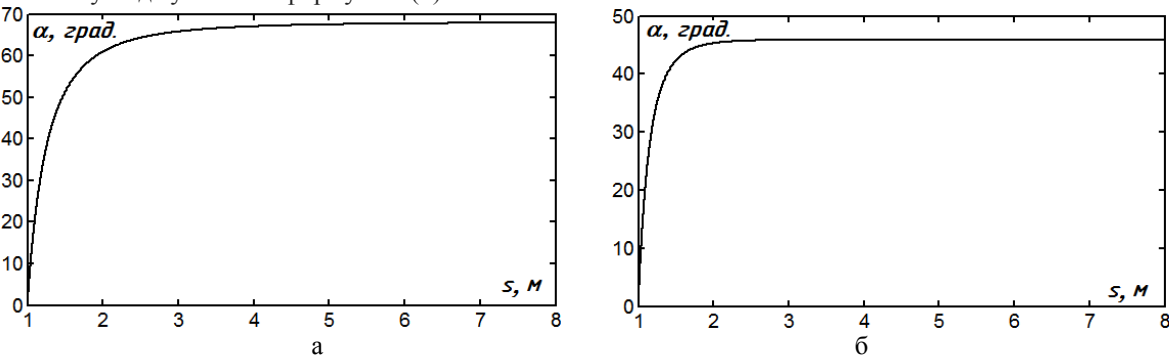


Рис. 4. Графіки зміни кута  $\alpha$  в градусах при русі частинки по кривій в напрямі прямолінійної ділянки:  
а)  $f=0,3$ ,  $w=8 \text{ м/с}^2$ ; б)  $f=0,3$ ,  $w=5 \text{ м/с}^2$

Розглянемо ще один приклад для швидкості руху частинки із змінними величиною і напрямом. Задамо швидкість частинки, яка описується синусоїдним законом в залежності від кута  $\alpha$ :

$$V = A \sin \alpha, \quad (15)$$

де  $A$  – стала величина.

В цьому випадку швидкість частинки має змінну величину і напрям. Підставимо у (8) вираз швидкості (15) і її похідну  $dV/d\alpha = A \cos \alpha$  і отримаємо внутрішнє рівняння кривої:

$$\frac{ds}{d\alpha} = \frac{A^2 \sin \alpha (\cos \alpha + f \sin \alpha)}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}. \quad (16)$$

Перейдемо до координатного запису за формулами (10), у яких прийнято позначення  $ds/d\alpha = \rho$ , і після підстановки (16) в (10) проінтегруємо отримані вирази:

$$x = \frac{A^2}{g} \int \frac{\sin \alpha \cos \alpha (\cos \alpha + f \sin \alpha)}{\sin \alpha - f \cos \alpha} d\alpha = A^2 \left[ f \frac{\ln(f \cos \alpha - \sin \alpha) - f\alpha}{g(1+f^2)} + \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{4g} \right]; \quad (17)$$

$$y = \frac{A^2}{g} \int \frac{\sin^2 \alpha (\cos \alpha + f \sin \alpha)}{\sin \alpha - f \cos \alpha} d\alpha = A^2 \left[ f \frac{f \ln(f \cos \alpha - \sin \alpha) + \alpha}{g(1+f^2)} - \frac{\cos 2\alpha}{4g} \right].$$

На рис. 5 за параметричними рівняннями (17) побудовано криві при  $A=1$ . Вони мають періодичний характер. За відсутності тертя (рис. 5,б) вітки кривої розташовані горизонтально. У точках звороту швидкість частинки змінює свій напрям: після підйому вгору починає рухатися вниз, тобто в момент зміни напрямку її величина дорівнює нулю. Якби існував вид транспорту, у якого був би відсутній опір переміщенню, то від зупинки до зупинки у вершинах кривої можна було б їздити без затрат енергії. По горизонтальній прямій цього зробити не вдасться, оскільки на початковому етапі потрібно затратити енергію для розгону транспортного засобу. Для економії енергії частково за таким принципом прокладають вітки метро: після початку руху поїзд їде вниз, а перед зупинкою піднімається вгору і процес гальмування відбувається природнім шляхом.

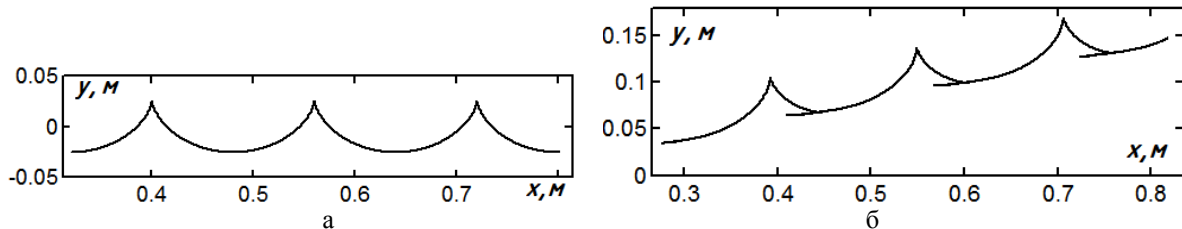


Рис. 5. Криві, побудовані за параметричними рівняннями (17) при  $A=1$ :  
а)  $f=0$ ; б)  $f=0,1$

При наявності сили тертя вітки розташовуються під певним кутом до горизонтальної лінії (рис. 5,б). Оскільки до рівнянь (17) входить вираз  $\ln(f \cos \alpha - \sin \alpha)$ , який дорівнює  $-\infty$  при  $\alpha = \arctg f$ , то побудова кривої ускладнюється, особливо із збільшенням коефіцієнта  $f$ . Це проявляється у побудові зайвих ліній (рис. 5,б).

### Висновки

Знайдено аналітичний опис руху частинки по кривих поперечного перерізу циліндрів із горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних під дією сили власної ваги. Задача розв'язується в два етапи: на першому етапі складається диференціальне рівняння руху в проекціях на дотичну до кривої. Його розв'язком є внутрішнє рівняння кривої у вигляді залежності кривини від довжини дуги кривої або ж довжини дуги від кута нахилу дотичної до кривої. На другому етапі відбувається перехід від внутрішнього рівняння кривої, яке не прив'язане до декартової системи координат, до параметричних рівнянь. Розроблений аналітичний опис дозволяє конструювати криві поперечного перерізу циліндрів за заданими умовами руху частинки.

### Список використаної літератури

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений [Текст]: в трех томах. Изд. 2-е. Т. 3 / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – 455 с.
2. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко. – К.: УАСХН, 1960. – 283 с.
3. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики / П.М. Заика. – К.: Изд-во УСХА, 1992. – 507 с.
4. Лінник М.К. Дослідження руху матеріальної частинки по внутрішній поверхні стаціонарного циліндра / М.К. Лінник, С.Ф. Пилипака // Вісник аграрної науки. – К., 2006. № 2. – С. 48–54.
5. Сысоев Н.И. Теоретические основы и расчет сортировки “Змейка” / Н.И. Сысоев // *Сельхозмашина*. – № 8, 1949. – С. 5 – 8.
6. Войтюк Д.Г. Знаходження траєкторії руху матеріальної точки по гравітаційній розгортній поверхні на прикладі розгортного гелікоїда / Д.Г. Войтюк, С.Ф. Пилипака // *Механізація і енергетика сільського господарства*. IV міжнародна науково-технічна конференція MOTROL-2003. – К.: НАУ, 2003. – Том 6. – С. 113–126.
7. Войтюк Д.Г. Дослідження руху матеріальної частинки по поверхні косої гелікоїда під дією сили власної ваги / Д.Г. Войтюк, М.К. Лінник, С.Ф. Пилипака // *Техніка АПК*. – 2006. – № 12. – С. 17 – 22.
8. Булгаков В.М. Математична модель руху матеріальної точки по плоскій кривій / В.М. Булгаков, С.Ф. Пилипака, Т.Н. Захарова // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2014. – Вип. 14. – Том 2. – С. 3 – 15.

## References

1. Goryachkin V.P. (1968) *Sobranie sochineniy [Tekst]: v treh tomah. Izd. 2-e. T. 3. M.: Kolos.*
2. Vasilenko, P. M. (1960) *Teoriya dvizheniya chastitsyi po sherohovatyim poverhnostyam selskohozyaystvennyih mashin.* Kiev: UASHN.
3. Zaika, P. M. (1992) *Izbrannyye zadachi zemledelcheskoy mehaniki.* Kiev: USHA.
4. Linnyk, M.K., & Pylypaka, S. F. (2006) *Doslidzhennia rukhu materialnoi chastynky po vnutrishnii poverkhni statsionarnoho tsylindra. Visnyk ahrarnoi nauky.* **2**, 48–54.
5. Syisoev, N. I. (1949) *Teoreticheskie osnovy i raschet sortirovki "Zmeyka". Selhozmashina.* **8**, 5-8.
6. Voitiuk, D. H., & Pylypaka, S. F. (2003) *Znakhodzhennia traiektorii rukhu materialnoi tochky po hravitatsiinii rozghortnii poverkhni na prykladi rozghortnoho helikoida. Proceedings of the Mekhanizatsiia i enerhetyka silskoho hospodarstva: materialy IV mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia MOTROL-2003. V. 6. (Ukraine, Kharkiv, October 17-19, 2003), Kyev: NAU, pp. 113-126.*
7. Voitiuk, D. H., Linnyk, M. K., & Pylypaka, S. F. (2006) *Doslidzhennia rukhu materialnoi chastynky po poverkhni kosoho helikoida pid diiei syly vlasnoi vahy. Tekhnika APK.* **12**, 17-22.
8. Bulhakov, V.M., Pylypaka, S. F., & Zakharova T.N. (2014) *Matematychna model rukhu materialnoi tochky po ploskii kryvii. Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol: TDATU.* **14**.– Tom 2, 3 – 15.

УДК 620.179.147+519.853.6

Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКА, В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, В.В.ТИЧКОВ

Черкаський державний технологічний університет

### ОПТИМАЛЬНИЙ СУРОГАТНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ НАКЛАДНИХ КРУГОВИХ НЕСПІВВІСНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ РІВНОМІРНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ В ЗОНІ КОНТРОЛЮ

*Виконано сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумів перетворювачів та апробовано різновиди функцій цілі, які найбільш придатні для розв'язку задачі оптимального синтезу і забезпечують рівномірну чутливість в зоні контролю. Розглянуто приклади синтезу при наступних формулюваннях функцій цілі: у вигляді квадратичного, мінімаксного, середньостепенної апроксимації мінімаксного критерію. Здійснено нелінійний послідовний синтез, що реалізовано виконанням спочатку лінійного синтезу для кожної структури збудження, а потім на наступному етапі отримані результати використано для нелінійного синтезу. Наведено значення приведеної похибки в зоні контролю для задачі лінійного та нелінійного синтезу.*

*Ключові слова:* сурогатна оптимізація, метамодель, комп'ютерний план експерименту, ЛП<sub>τ</sub>-послідовність, поверхня відгуку, нейронна мережа, лінійний синтез, нелінійний синтез, вихрострумівий перетворювач, густина вихрових струмів

Р.В. ТРЕМБОВЕЦКАЯ, В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, В.В.ТЫЧКОВ

Черкасский государственный технологический университет

### ОПТИМАЛЬНЫЙ СУРРОГАТНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАКЛАДНЫХ КРУГОВЫХ НЕСООСНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАВНОМЕРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ В ЗОНЕ КОНТРОЛЯ

*Выполнен суррогатный параметрический синтез накладных круговых несоосных вихретоковых преобразователей и апробированы разные функции цели наиболее приемлемые для решения задачи оптимального синтеза обеспечивающие равномерную чувствительность в зоне контроля. Рассмотрены примеры синтеза со следующими формулировками функции цели: в виде квадратичного, минимаксного, среднестепенной аппроксимации минимаксного критерия. Выполнен нелинейный последовательный синтез, который реализован сначала линейным синтезом для каждой структуры возбуждения, а потом на следующем этапе полученные результаты использованы для нелинейного синтеза. Определено значение приведенной погрешности в зоне контроля для задачи линейного и нелинейного синтеза.*

*Ключевые слова:* суррогатная оптимизация, метамодель, компьютерный план эксперимента, ЛП<sub>τ</sub>-последовательность, поверхность отклика, нейронная сеть, линейный синтез, нелинейный синтез, вихретоковый преобразователь, плотность вихревых токов

R.V. TREMBOVETSKA, V.Ya. HALCHENKO, V.V. TYCHKOV

Cherkasy state technological university

### OPTIMAL SURROGATE PARAMETRIC SYNTHESIS OF SURFACE CIRCULAR NON- AXIAL EDDY-CURRENT PROBES WITH UNIFORM SENSITIVITY IN THE TESTING ZONE

*A surrogate parametric synthesis of surface circular non-axial eddy-current probes is performed. Various types of target functions, which are most suitable for solving optimal synthesis problem and provide uniform sensitivity in the testing zone are tested. Examples of synthesis with the following formulas of the objective functions in the form of quadratic and minimax criterion and medium-stepped approximation of the minimax criterion are considered. In order to realize the optimal synthesis problem using neural network technologies a metamodel was developed. It reduces the computational resource intensity of the mathematical model. With the help of the neural networks committee and composite networks the metamodel is developed. Such networks improves the average model error of a multidimensional response surface compared to single networks. In the search field, a decomposition on three sub-regions is made. The groups of RBF-neuron networks for the plan for each sub-region with the number of  $N_{\text{training}}$  points were created. The best networks groups by the coefficients determination  $R^2$ , the standard deviations ratio S.D.ratio, the average value of the model error were selected. Networks with a productivity of more than 0.9 were used together. A network committee on the last cascade of the composite is organized. The best structure of the excitation system was*

previously determined. A linear synthesis with different number of coils with their uniform and uneven spatial arrangement was performed. As a result of the comparative analysis, an excitation structure with the least value non-relation compared to other structures was obtained. To solve the optimization problem metaheuristic algorithms for finding a global extremum, such as, a hybrid algorithm based on a genetic algorithm with a local search using the Nelder-Mead simplex method and particle swarm algorithm PSO-RND with random link topology strategy are used. The given error value in the testing zone for excitation systems implemented with the use of various target functions is defined. A nonlinear sequential synthesis of the probe through the implementation of the first linear synthesis for the constituent structures is made. The obtained results for the next stage for nonlinear synthesis are used. The value of the error in the testing zone for the problem of the first stage linear synthesis is 11.23% and for the final nonlinear is 9.02%.

**Keywords:** surrogate optimization, metamodel, computer experiment plan,  $LP_\tau$ -sequence, response surface, neural network, linear synthesis, nonlinear synthesis, eddy current probe, eddy current density

### Постановка проблеми

Достатньо високі вимоги до якості та надійності продукції без сумніву вимагають відповідного рівня засобів вимірювання та контролю, провідними серед яких можна відзначити неруйнівні методи, зокрема вихрострумний метод контролю. Цей метод контролю достатньо широко використовується для виявлення і визначення параметрів дефектів, контролю розмірів об'єкту контролю (ОК), параметрів вібрацій, визначення фізико-механічних параметрів і структурного стану матеріалів, виявлення електропровідних об'єктів у непровідному середовищі та інші.

Будь-які типи котушок збудження накладних вихрострумних перетворювачів (НВСП) мають суттєвий недолік - розподіл густини вихрових струмів (ГВС) на поверхні ОК неоднорідний. Цей факт негативно впливає на чутливість методу. В той же час якість виявлення дефектів вихрострумним методом залежить від розташування збуджуючої котушки відносно ОК. Практично даний недолік можливо усунути використанням нестандартної конструкції у вигляді сукупності збуджуючих котушок. Систему котушок із різноманітним розташуванням котушок відносно ОК та відповідною схемою живлення надалі будемо називати структурою збудження. Конструктивна реалізація структур збудження досить різноманітна. Загалом, як приклад, можна навести наступні структури збудження: концентричні котушки із різними радіусами, що розташовані на однаковій висоті над ОК; котушки із різними радіусами, коли їх центри зміщені; системи котушок із різними радіусами, що розташовані на різних висотах із зміщенням центрів одного відносно інших. При цьому розташування вимірювальної котушки відносно збуджуючої може бути або на одній осі і тоді НВСП вважають співвісним, або ж безпосередньо під витками, тобто неспіввісним розташування. Такий НВСП вважають неспіввісним. У разі застосування різноманітних структур збудження із відповідною схемою включення можна зменшити суттєву нерівномірність розподілу ГВС і відповідно досягти однорідного розподілу ГВС на поверхні ОК.

У результаті отримання рівномірного розподілу ГВС на поверхні ОК забезпечується використання певної структури збудження НВСП, що приводить до майже однорідної чутливості в зоні контролю.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зупинімося докладніше на вже вирішених та відповідно не вирішених задачах оптимального синтезу, що опубліковані в останній час. Лінійна задача синтезу вихрострумного перетворювача (ВСП) із заданою структурою збуджуючого поля в зоні контролю вирішена в роботі [1]. Проте практична реалізація таких перетворювачів ускладнена, оскільки при лінійному синтезі отримуються дійсні значення густини струму в секціях котушки. Розглядається варіант нерухомого перетворювача. Випадок, коли отримання заданої структури поля досягається параметрами перетворювача, які нелінійно входять до формули розрахунку збуджуючого поля, в роботі не розглянуто.

В роботі [2] здійснена задача нелінійного оптимального синтезу. За умови фіксованої густини струму збудження виконано розв'язок задачі щодо розміщення обмоток секцій котушок збудження у просторі із визначенням їх геометричних розмірів.

Підходи, розглянуті в [1, 2], є методами параметричної оптимізації, тоді як не вирішеною залишилась проблема вибору структури системи збудження ВСП. Метод структурно-параметричного синтезу джерела електромагнітного поля збудження, що запропоновано в роботі [3] дозволяє вирішити ці проблеми.

В роботі [4] запропоновано методологію оптимізації конструкції системи збудження НВСП. Застосуванням багатоцільового генетичного алгоритму оптимізації отримано тангенціальний і рівномірний розподіл вихрових струмів за допомогою планарної котушки лінійних вихрових струмів. В такому випадку є можливість врахувати багаточисельні вимоги до проєктованого перетворювача.

Синтез методом кінцевих елементів сумісно із методами оптимізації Монте-Карло та генетичного алгоритму продемонстровано в роботах [5, 6]. Використання таких чисельних методів



аналізу збуджуючого поля підвищує точність обчислення, проте час моделювання суттєво збільшується. В дослідженні автори обмежилися розглядом котушок кругової форми і планарних котушок лінійних вихрових струмів. При цьому вклад струмів переносу у формування збуджуючого поля не враховувався, тобто розглядався варіант нерухомого перетворювача.

Ідея придушення вихрових струмів на поверхні ОК, що забезпечує більш глибоке проникнення вихрових струмів в товщу матеріалу, запропонована в роботі [7]. Це реалізовано за допомогою комбінації декількох котушок. Струми збудження цих котушок мають різні амплітуди і фази, що надає можливості емуляції бажаного ефекту. Невирішеними питаннями в цій роботі залишається визначення структури системи збудження та дія струмів переносу в ОК для рухомих ВСП. Перспективи запропонованих в даній статті досліджень полягають у створенні систем збудження рухомих НВСП кругової форми, які забезпечують рівномірний розподіл ГВС на поверхні ОК. Вирішити таку задачу дозволяє оптимальний параметричний синтез, що забезпечує розв'язок ресурсоемних задач оптимізації.

### Мета дослідження

**Мета роботи:** оптимальний сурогатний параметричний синтез рухомих накладних кругових неспіввісних вихрострумових перетворювачів, що мають рівномірну чутливість в зоні контролю та визначення найбільш придатного формулювання функції цілі для його ефективного забезпечення.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Насамперед початковими вихідними даними для проектування в задачі синтезу неспіввісного НВСП задається априорі бажаним розподілом ГВС  $J_{reference}$  на поверхні ОК рис. 1.

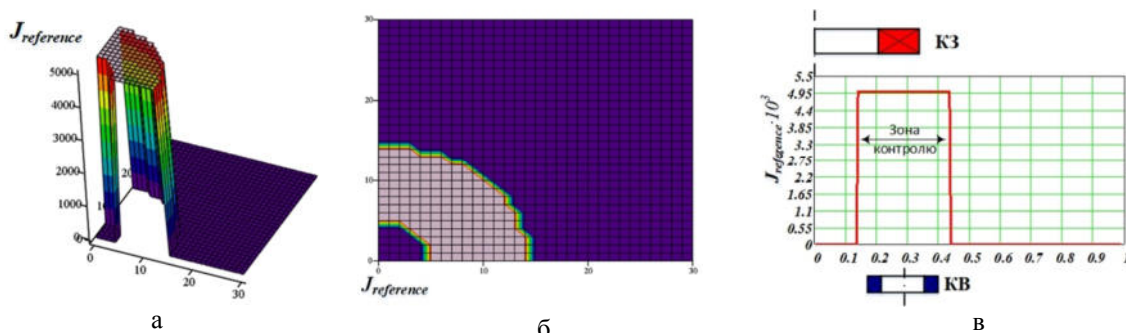


Рис. 1. Розподіл ГВС на поверхні ОК неспіввісного НВСП: а) 3D-модель; б) лінії рівня; в) розподіл ГВС в перетині;

КЗ – котушка збудження, КВ – котушка вимірювальна

Далі необхідно сконцентрувати увагу на функціях цілі, які здебільшого застосовуються в оптимізаційних задачах. Переважно цільову функцію для оптимального синтезу формують як квадрат відхилення:

$$F_{target} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $J_{reference}$  – бажане значення ГВС в контрольній точці;  $J_{ik}$  – ГВС в контрольній точці ОК з номером  $i$ , створена  $k$ -ою котушкою системи збудження НВСП;  $N$  – кількість контрольних точок в зоні;  $M$  – кількість котушок у системі збудження кругового НВСП.

Також розглядалися альтернативні варіанти формулювання функції цілі для ефективного забезпечення оптимального синтезу НВСП в сенсі підвищення вимог до точності в реалізації заданого розподілу ГВС. Одним із таких альтернативних варіантів є пошук мінімуму функції, що здійснюється за максимальним значенням різниці  $J_{ik} - J_{reference}$ , так званий мінімаксний критерій, який передбачає дотримання жорстких вимог до точності синтезу в кожній контрольній точці:

$$F_{target} = \max |J_{ik} - J_{reference}| \rightarrow \min, \quad (2)$$

Проте не всі методи оптимізації можуть забезпечити реалізацію цього критерію через порушення гладкості. Тоді як використання середньостепеневі апроксимації мінімаксного критерію теоретично дозволяє виправити ситуацію щодо підвищення точності. Функція цілі при середньостепеневі апроксимації мінімаксного критерію має вигляд:

$$F_{target} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^y \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $\gamma$ -ступінь апроксимації,  $\gamma = 3, 4, 5, \dots$

Для складових ГВС в ОК формулу функціональної залежності отримано аналітично в ряді робіт [8, 9] розв'язком прямої задачі електродинаміки у вигляді диференціальних рівнянь Максвела для вибраної структури збудження. Ця аналітична залежність враховує просторові координати розташування перетворювача над ОК, геометричні розміри котушки збудження, параметри електроживлення, електрофізичні параметри матеріалу ОК. На жаль, практичне застосування її в задачі оптимального синтезу неможливе унаслідок великої обчислювальної ресурсоемності. Так в роботі [10] показана ресурсоемність моделі для декількох структур збудження, а саме витка кругової форми, а також витка прямокутної форми, що розташований паралельно та перпендикулярно до ОК. Отримані результати [10] свідчать про неможливість безпосереднього використання аналітичної функціональної залежності [8] в задачах оптимального синтезу через значні часові затрати. Здебільшого вирішенням цієї проблеми є застосування сурогатної оптимізації, що на ряді прикладів показано авторами в роботах [11, 12], сумісно з методами стохастичної метаевристичної оптимізації [13]. Основні переваги сурогатної оптимізації полягають у використанні такої метамоделі НВСП, яка значно простіша в чисельній реалізації і менш ресурсоемна, що врешті-решт дозволяє вирішити задачу оптимального синтезу. Зокрема, для забезпечення цього ефекту при побудові метамоделі застосовуються RBF- та MLP-нейромережеві технології.

В роботах [14-16] авторами на деяких прикладах показано ефективність використання нейромережевої метамоделі, окрім того особливості їх застосування відповідно до задач синтезу НВСП [11, 12]. Слід зазначити, що у випадку побудови метамоделі при варіації тільки двох змінних  $J = f(x, y)$ , цілком достатньо використовувати одинарні RBF- та MLP-метамоделі, які мають відносно значення середньої модельної похибки апроксимації (MAPE) на етапі навчання до 6 %, а на етапі відтворення - до 8-9 % [11, 12, 16].

Разом з тим, якщо побудова метамоделі виконується для випадку варіювання трьох змінних  $J = f(x, y, r)$ , то отримані найкращі одинарні RBF-метамоделі мають середню величину модельної похибки від 22 % до 29 %. Застосувавши один із методів підвищення точності, а саме комітет нейронних мереж, вдалося несуттєво зменшити цю похибку як на етапі навчання, так і на етапі відтворення до 18,08 % та 19,8 % відповідно. Тоді як при використанні іншого методу у вигляді композитної нейронної мережі вдалося досягти зменшення відносної величини середньої модельної похибки з 22,6 % до 10,12 % на етапі навчання та з 31 % до 15,93 % на етапі відтворення [17]. Порівняльний аналіз свідчить, що побудова метамоделі за допомогою комітету нейронних мереж та композитних мереж дає покращення MAPE багатовимірної поверхні відгуку у порівнянні до одиночних мереж.

Далі розглянемо модельний приклад синтезу концентричних неспіввісних НВСП при наступних вихідних даних: товщина струмопровідного матеріалу ОК  $d = 10$  мм; висота розташування системи витків над ОК  $z_0 = 3$  мм; частота  $f = 10^{-3}$  МГц; електрофізичні параметри матеріалу  $\sigma = 3,745 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu_r = 1$ . Вище було наведено переваги побудови метамоделі із застосуванням комітету та композиту нейронних мереж. Саме тому, враховуючи ці переваги, в даному дослідженні метамодель створювалася поєднанням застосування і композиту, і комітету нейронних мереж при варіюванні трьох параметрів апроксимації в межах  $x = 0 \dots 30$  мм;  $y = 0 \dots 30$  мм;  $r = 2 \dots 15$  мм. Для спрощення спочатку вважаємо швидкість руху НВСП  $\vec{v} = (0,0,0)$ , що відображено при побудові метамоделі. Але, перш за все виконується декомпозиція простору пошуку на декілька підобластей. В кожній із підобластей план експерименту для створення функції-замісника реалізовано за допомогою рівномірного комп'ютерного заповнення точками тривимірного простору пошуку, а саме, з використанням сукупності ЛП<sub>т</sub>-послідовностей Соболя  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{52}$  [14]. Так, наприклад, для підобласті  $2 \leq r \leq 6$  мм реалізовувалися такі випадки ЛП<sub>т</sub>-послідовностей, як  $\xi_1, \xi_2, \xi_5$  так і  $\xi_1, \xi_3, \xi_5$ . В подальшому для кожної із підобластей отримано апроксимаційні залежності за допомогою композиту нейронних мереж, тоді як побудова комітету нейронних мереж використана на завершальному етапі композиту і тільки для мереж, які мають продуктивність більше 90 %. Розглянувши структуру побудови метамоделі, перейдемо до комплексу показників, за якими оцінювалася адекватність та інформативність отриманої метамоделі [14]. Передусім це середня величина модельної похибки, що складає від 3,56 % до 6,76 % відповідно на етапі навчання та відтворення. Потім середній квадрат залишків  $MS_R = 0,000038$  і  $0,000379$  та сума квадратів залишків  $SS_R = 0,0394$  і  $0,782$  відповідно за етапами.

Зрештою на цьому попередній підготовчий або перший етап задачі оптимального синтезу, що включає в себе розрахунок розподілу ГВС за аналітичною математичною моделлю та побудову на основі цих даних метамоделі-замісника, вважаємо завершеним.

Перейдемо безпосередньо до реалізації задачі оптимального синтезу, тобто отримання розв'язку (1)-(3). Для того, щоб отримати наперед заданий розподіл ГВС в рамках лінійного синтезу, наприклад П-подібний (рис.1), необхідно визначити магніторухісну силу (МРС)  $I_{w_k}$  для кожної із котушок системи

збудження за умови відомих координат їх розміщення у просторі та їх заданої кількості  $M$ . Вважатимемо, що структура збудження містить  $M$  котушок радіусами  $r_k$  ( $k = 1 \dots M$ ), які коаксіально та рівномірно або нерівномірно розташовані на однаковій відстані  $z_0$  над ОК. Вибір структури системи збудження забезпечується варіацією кількості котушок  $M = \text{var}$  та їх просторовим розташуванням і реалізується проєктантом, зважаючи на його досвід та інтуїцію.

Для синтезу кругового концентричного НВСП із неспіввісною вимірювальною котушкою (рис.1) апіорі заданий П-подібний розподіл ГВС на поверхні ОК:

$$J_{reference} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq r \leq 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м; } r > 14,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ 5000 \text{ А/м}^2 & \text{при } 4,5 \cdot 10^{-3} < r \leq 14,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{cases} \quad (4)$$

Перш ніж знаходити розв'язок із застосуванням різноманітних формулювань функцій цілі визначалася найкраща структура системи збудження. Тобто виконано лінійний синтез при кількості котушок  $M = 4, 5, 6, 7$  із їх рівномірним та нерівномірним просторовим розташуванням. У результаті порівняльного аналізу отримано структуру збудження, що має шість котушок із рівномірним розташуванням, яка забезпечує найменше значення нев'язки у порівнянні з іншими структурами. Надалі розв'язок задачі оптимального синтезу для заданого П-подібного розподілу (4) знаходився шляхом визначення мінімуму цільової функції для таких її випадків як квадратичний критерій (1), мінімаксий критерій (2) та середньостепенева апроксимація мінімаксу при  $\gamma = 4$  (3). Лінійний синтез виконано при наступних вихідних даних: кількість котушок  $M=6$ , що мають радіуси:  $r_k = 4 \cdot 10^{-3}$ ;  $6,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $8,2 \cdot 10^{-3}$ ;  $10,3 \cdot 10^{-3}$ ;  $12,4 \cdot 10^{-3}$ ;  $14,5 \cdot 10^{-3}$  м. Контрольні точки в зоні  $(x \times y) = (30 \times 30)$  мм розташовані рівномірно і їх кількість була достатньо великою та складала 210. Застосовуючи матаевристичні алгоритми оптимізації пошуку для глобального екстремуму [3, 18–20], а саме, гібридний алгоритм на основі генетичного алгоритму з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда; алгоритм рою частинок PSO-RND зі стратегією випадкової топології зв'язків отримано розв'язок задачі оптимального синтезу. Результати чисельних експериментів лінійного синтезу НВСП з використанням різних цільових функцій представлено лініями рівня розподілу ГВС на рис. 2, а параметри МРС котушок в табл. 1. Також лініями рівня на рис. 3 показано абсолютне значення похибки отриманого розв'язку. Разом з тим визначено приведені значення похибки в зоні контролю  $4,5 \text{ мм} \leq r \leq 14,55 \text{ мм}$  для систем збудження, що реалізовані з використанням різних цільових функцій (рис. 2, а-в), та яка відповідно складає 10,54 %; 15,77 %; 14,63 %.

Таблиця 1

Результати лінійного синтезу системи збудження з використанням різних типів цільових функцій

|   | МРС котушок системи $Iw_k$                                          |                                                                     |                                 |
|---|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|   | $\sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^2$ | $\sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^4$ | $\max  J_{ik} - J_{reference} $ |
|   | PSO-RND                                                             | гібрид ГА                                                           | PSO-RND                         |
| 1 | -0,60336383                                                         | 0,42148688                                                          | -0,41493955                     |
| 2 | 0,060770884                                                         | -0,74260541                                                         | 0,08596242                      |
| 3 | 1,0080765                                                           | 0,08674651                                                          | 0,45971143                      |
| 4 | -0,67578201                                                         | 1,653317                                                            | -0,03170058                     |
| 5 | 1,0809852                                                           | -1,017734                                                           | 0,59856495                      |
| 6 | -0,12396826                                                         | 0,58822349                                                          | -0,0015540121                   |

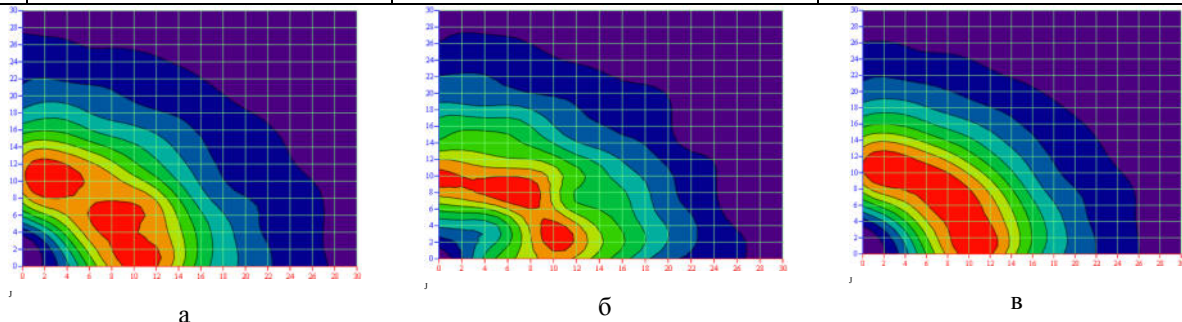


Рис. 2. Лінії рівня розподілу ГВС: а) квадратична цільова функція; б) цільова функція з використанням середньостепеневої апроксимації при  $\gamma=4$ ; в) мінімаксий критерій

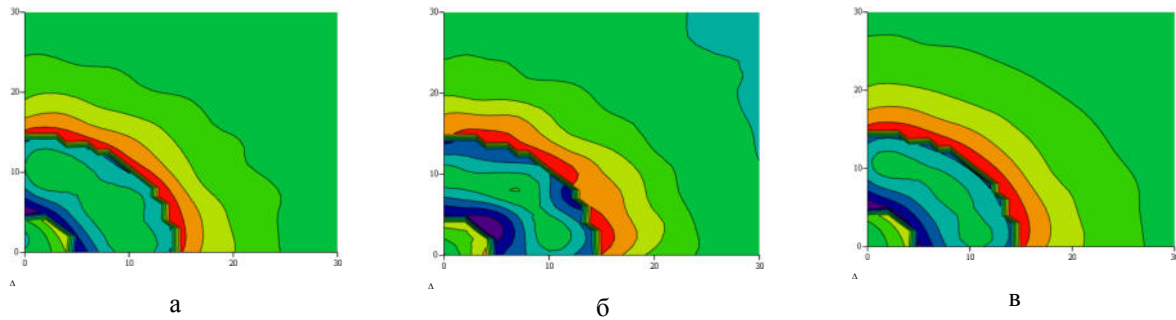


Рис. 3. Лінії рівня розподілу абсолютного значення похибки отриманого розв'язку  
а) квадратична цільова функція; б) цільова функція з використанням середньостепеневі апроксимації при  $\gamma=4$ ;  
в) мінімакський критерій

Далі розглядався приклад нелінійного синтезу НВСП, що реалізовано послідовно спочатку лінійним синтезом, в результаті якого визначено MPC  $Iw_k$  для кожної структури збудження, а потім отримані результати використовувалися як початкові для нелінійного синтезу, в результаті якого отримано  $r_k$ . До того ж, для такого підходу довелося виконати перехід від задачі умовної оптимізації до безумовної методом заміни змінних. Тобто накладено на шуканий параметр  $r_k$  обмеження  $r_{min} \leq r_k \leq r_{max}$  і здійснена зміна змінних [13], що дозволяє знайти фізично реалізоване рішення.

У такий спосіб здійснено нелінійний синтез НВСП із п'яти котушок з нерівномірним розташуванням та початковими радіусами:  $r_k = 4 \cdot 10^{-3}$ ;  $6 \cdot 10^{-3}$ ;  $10 \cdot 10^{-3}$ ;  $13 \cdot 10^{-3}$ ;  $14,5 \cdot 10^{-3}$  м. Параметричний синтез виконано із застосуванням матаевристичного алгоритму оптимізації пошуку глобального екстремуму, а саме, гібридного алгоритму на основі генетичного алгоритму з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда [13]. Результати чисельних експериментів даного прикладу представлено на рис. 4 а, в, а параметри MPC котушок в табл. 2. При цьому приведені значення похибки в зоні контролю для задачі першоетапного лінійного синтезу складає 11,23 %, а для заключного нелінійного - 9,02 %. Абсолютне значення похибки отриманого розв'язку задачі показано на рис. 4 б, г відповідно.

Таблиця 2

Результати послідовного нелінійного синтезу системи збудження НВСП

|                       |            |           |            |            |             |
|-----------------------|------------|-----------|------------|------------|-------------|
| $Iw_k$ , А · витки    | -0,7601633 | 1,079948  | 0,09061057 | 0,87852538 | -0,28356201 |
| $r_k \cdot 10^{-3}$ м | 5,9440137  | 6,9553207 | 9,3783332  | 11,67332   | 10,0032     |

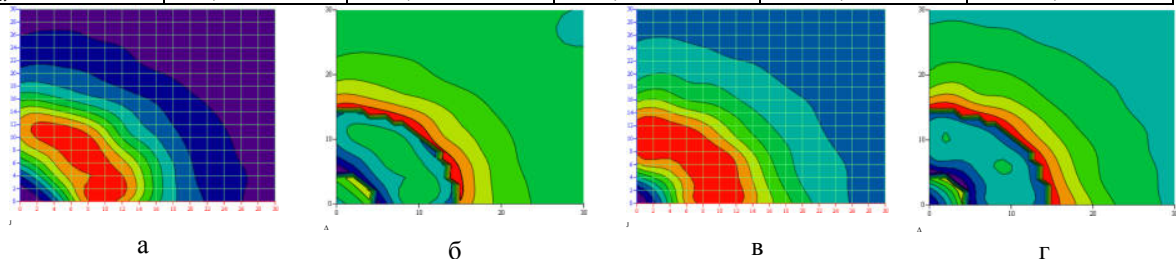


Рис. 4. Результати послідовного синтезу НВСП: а) лінії рівня розподілу ГВС при лінійному синтезі системи збудження НВСП; б) лінії рівня розподілу абсолютного значення похибки отриманого розв'язку; в) лінії рівня розподілу ГВС при нелінійному синтезі системи збудження НВСП; г) абсолютне значення похибки отриманого розв'язку

### Висновки

В роботі чисельними експериментами отримано розв'язки задач оптимального синтезу з використанням цільової функції у вигляді квадратичного, мінімакського критерію та середньостепеневі апроксимації мінімакського критерію. Порівняльний аналіз результатів синтезу у вигляді розподілу ГВС та значення приведеної похибки в зоні контролю при використанні різних критеріїв, показує майже однаковий рівень похибок, тобто не можна віддати перевагу ні одному із них. Також встановлено, що послідовний нелінійний синтез доцільно застосовувати для уточнення геометричних розмірів структури збудження, що відповідно впливає на зменшення похибки розподілу ГВС в зоні контролю.

### Список використаної літератури

1. Стеблев Ю. И. Синтез вихретоковых преобразователей с заданной структурой возбуждающего поля в зоне контроля. *Дефектоскопия*. 1986. № 4. С. 58-64.
2. Гальченко В. Я., Павлов О. К., Воробйов М. О. Нелінійний синтез магнітних полів збудження вихреструмових перетворювачів дефектоскопів. *Методи і прилади контролю якості*. 2002. № 8. С. 3-5.



3. Gal'chenko V. Ya., Vorob'ev M. A. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005. Vol. 41. №. 1. P. 29–33.
4. Su Z., Ye C., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2016. Vol. 52. №. 1-2. P. 315-322.
5. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1650, P. 405.
6. Stawicki K., Gratkowski S. Optimization of Exciter Coils in Eddy Current Transducer for Testing Thick Conducting Plates. *Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering*. Proceedings of ISEF'05. 2006. P. 497-502.
7. Janoušek L. Effect of exciting system configuration on eddy currents distribution in non-destructive evaluation of materials. *Przegląd elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89. № 3a. P. 256-258.
8. Itaya T., Ishida K., Kubota Y., Tanaka A., Takehira N. Visualization of Eddy Current Distributions for Arbitrarily Shaped Coils Parallel to a Moving Conductor Slab. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2016. Vol. 47. P. 1-12.
9. Ishida T., Itaya T., Tanaka A., Takehira N. Magnetic Field Analysis of an Arbitrary Shaped Coil Using Shape Functions. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45, № 1. P. 104-112.
10. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 95, №. 5/5. P. 39-46.
11. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. The RBF-Metamodel Development of Surface Eddy-Current Probe for the Surrogate Optimal Synthesis Problem. *International Journal "NDT Days"*. 2018. Vol. 1, Iss. 4. P. 425-433.
12. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В. Нейромережева метамодель циліндричного накладного вихрострумового перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3 (66), Т. 1, С. 32–38.
13. Гальченко В. Я., Трембовецькая Р. В. MathCAD: математические методы и инструментальные средства оптимизации. Черкассы: ЧП Гордиенко Е.И., 2018. 516 с.
14. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен. *Вісник ХТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2018. №. 74. С. 60-72.
15. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. The Approximation Surface Review of the Multidimensional Target Function for Surrogate Optimization Problem. *Advanced Information Systems and Technologies: VI International scientific conference, Sumy, 16–18 May, 2018 : proceedings*. – [Edited by S. I. Protsenko, V. V. Shendryk]. – Sumy: Sumy State University, 2018. P. 34–38.
16. Трембовецька Р. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В. Побудова MLP-метамоделі накладного вихрострумового перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу. *Технічні вісники*. 2018. № 1(47), № 2(48). С. 27-31.
17. Трембовецька Р. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В. Методи покращення точності нейромережевих метамоделей накладних вихрострумових перетворювачів для сурогатного синтезу. *Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2018) : 2-nd scientific conference with international participation, Poland, Lublin, 15–19 october 2018. : Conference proceedings*. – Poland : USNDT. 2018. № 2. P. 47-49.
18. Gal'chenko V. Ya., Yakimov A. N., Ostapushchenko D. L. Pareto-optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet. *Technical Physics*. 2012. Vol. 57, Iss. 7. P. 893–899.
19. Гальченко В. Я., Якимов А. Н., Остапущенко Д. Л. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции. *Информационные технологии*, 2010. №. 9. С. 9-16.
20. Гальченко В. Я., Якимов А. Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роем частиц. Черкассы: ФЛП Третьяков А.Н., 2015. 160 с.

#### ТРАНСЛІТЕРАЦІЯ літератури

1. Steblev Yu. I. Sintez vihretokovykh preobrazovateley s zadannoy strukturoy vzbuzhdayushchego polya v zone kontrolya. *Defektoskopiya*. 1986. № 4. S. 58-64.
2. Halchenko V. Ya., Pavlov O. K., Vorobiov M. O. Neliniyni syntez mahnitnykh poliv zbudzhennia vykhrostrumovykh peretvoriuvachiv defektoskopiv. *Metody i prylady kontroliu yakosti*. 2002. № 8. S. 3-5.

3. Gal'chenko V. Ya., Vorob'ev M. A. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005. Vol. 41. №. 1. P. 29–33.
4. Su Z., Ye C., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2016. Vol. 52. №. 1-2. P. 315-322.
5. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1650, P. 405.
6. Stawicki K., Gratkowski S. Optimization of Exciter Coils in Eddy Current Transducer for Testing Thick Conducting Plates. *Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering*. Proceedings of ISEF'05. 2006. P. 497-502.
7. Janoušek L. Effect of exciting system configuration on eddy currents distribution in non-destructive evaluation of materials. *Przegląd elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89. № 3a. P. 256-258.
8. Itaya T., Ishida K., Kubota Y., Tanaka A., Takehira N. Visualization of Eddy Current Distributions for Arbitrarily Shaped Coils Parallel to a Moving Conductor Slab. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2016. Vol. 47. P. 1-12.
9. Ishida T., Itaya T., Tanaka A., Takehira N. Magnetic Field Analysis of an Arbitrary Shaped Coil Using Shape Functions. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45, № 1. P. 104-112.
10. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 95, №. 5/5. P. 39-46.
11. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. The RBF-Metamodel Development of Surface Eddy-Current Probe for the Surrogate Optimal Synthesis Problem. *International Journal "NDT Days"*. 2018. Vol. 1, Iss. 4. P. 425-433.
12. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. Neiromerezheva metamodel tsylindrychnoho nakladnoho vykhrostrumovoho peretvoriuvacha yak skladova surohatnoho optymalnoho syntezu. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2018. № 3 (66), T. 1, S. 32–38.
13. Galchenko V. Ya., Trembovetskaya R. V. MathCAD: matematicheskie metody i instrumentalnye sredstva optimizatsii. Cherkassy: ChP Gordienko E.I., 2018. 516 s.
14. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. Zastosuvannia neiromkompiutynha na etapi pobudovy metamodeli v protsesi optymalnoho surohatnoho syntezu anten. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia*. 2018. №. 74. S. 60-72.
15. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. The Approximation Surface Review of the Multidimensional Target Function for Surrogate Optimization Problem. *Advanced Information Systems and Technologies: VI International scientific conference, Sumy, 16–18 May, 2018 : proceedings*. – [Edited by S. I. Protsenko, V. V. Shendryk]. – Sumy: Sumy State University, 2018. P. 34–38.
16. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Pobudova MLP-metamodeli nakladnoho vykhrostrumovoho peretvoriuvacha dlia zadach surohatnoho optymalnoho syntezu. *Tekhnichni visti*. 2018. № 1(47), № 2(48). S. 27-31.
17. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Metody pokrashchennia tochnosti neiromerezhevykh metamodeli nakladnykh vykhrostrumovykh peretvoriuvachiv dlia surohatnoho syntezu. *Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2018) : 2-nd scientific conference with international participation, Poland, Lublin, 15–19 october 2018. : Conference proceedings*. – Poland : USNDT. 2018. № 2. P. 47-49.
18. Gal'chenko V. Ya., Yakimov A. N., Ostapushchenko D. L. Pareto-optimal parametric synthesis of axisymmetric magnetic systems with allowance for nonlinear properties of the ferromagnet. *Technical Physics*. 2012. Vol. 57, Iss. 7. P. 893–899.
19. Galchenko V. Ya., Yakimov A. N., Ostapushchenko D. L. Poisk globalnogo optimuma funktsiy s ispolzovaniem gibrida multiagentnoy rovoy optimizatsii s evolyutsionnyim formirovaniem sostava populyatsii. *Informatsionnyie tehnologii*. 2010. №. 9. S. 9-16.
20. Galchenko V. Ya., Yakimov A. N. Populyatsionnyie metaevristicheskie algoritmy optimizatsii roem chastits. Cherkassy: FLP Tretyakov A.N., 2015. 160 s.



УДК 536:621.9 (075.8)

А. В. УСОВ, М. В. КУНИЦЫН

Одесский национальный политехнический университет

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Рассмотрены возможности технологического обеспечения качества финишной обработки рабочих поверхностей цилиндров с использованием покрытий из износостойких материалов. Финишные методы обработки изделий с износостойкими покрытиями приводят к образованию дефектов на обрабатываемых поверхностях, снижающих эксплуатационные характеристики этих изделий. Анализ причин образования сколов и трещин на обрабатываемых поверхностях указанных изделий показал, что появление этих дефектов связано с тепловыми процессами, сопровождающими механическую обработку. При этом необходимо учитывать влияние структурной неоднородности обрабатываемого слоя изделия на механизм зарождения и развития дефектов типа трещин под действием термомеханических процессов, сопровождающих алмазно-абразивную обработку. Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием, имеющим участки частичного отслоения в процессе нанесения. Проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе  $Ni/Ni-TiO_2$  полученных методом электрохимического осаждения. Подобраны рациональные режимы обработки цилиндрической группы, характеристики инструмента с учётом наследственных дефектов при нанесении покрытия, обеспечивающие необходимое качество.

Ключевые слова: надёжность, долговечность, трибокоррозия, износостойкость, отслоение, термомеханические процессы, алмазно-абразивная обработка.

А. В. УСОВ, М. В. КУНИЦЫН

Одеський національний політехнічний університет

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Розглянуто можливості технологічного забезпечення якості фінішної обробки робочих поверхонь циліндрів з використанням покриттів зі зносостійких матеріалів. Фінішні методи обробки виробів зі зносостійкими покриттями призводять до утворення дефектів на оброблюваних поверхнях, що знижують експлуатаційні характеристики цих виробів. Аналіз причин утворення відколів і тріщин на оброблюваних поверхнях зазначених виробів показав, що поява цих дефектів пов'язане з тепловими процесами, які супроводжують механічну обробку. При цьому необхідно враховувати вплив структурної неоднорідності оброблюваного шару виробу на механізм зародження і розвитку дефектів типу тріщин під дією термомеханічних процесів, що супроводжують алмазно-абразивну обробку. Розроблено аналітичну модель по визначенню термомеханічного стану робочої поверхні циліндра зі зносостійким покриттям, що має ділянки часткового відшарування в процесі нанесення. Проведено трибокоррозійні дослідження композиційних матеріалів на основі  $Ni/Ni-TiO_2$  отриманих методом електрохімічного осадження. Підібрано оптимальні режими обробки циліндричної групи, характеристики інструменту з урахуванням спадкових дефектів при нанесенні покриття, що забезпечують необхідну якість.

Ключові слова: надійність, довговічність, трибокоррозія, зносостійкість, відшарування, термомеханічні процеси, алмазно-абразивна обробка.

A. V. USOV, M. V. KUNITSYN

Odessa National Polytechnic University

## TECHNOLOGICAL QUALITY ASSURANCE OF FINISHING OF CYLINDRICAL SURFACES WITH WEAR-RESISTANT COATINGS

The study of thermomechanical processes in coated products during their processing and operation was carried out to determine the conditions for the formation of defects in the delamination of coatings from the base material and their elimination taking into account the physicomachanical state of the surface layer, technological parameters of finishing processing and hereditary defects arising during coating operations. The possibilities of technological quality assurance of finishing the working surfaces of cylinders using coatings of wear-resistant materials are considered. Finishing methods of processing products with wear-resistant coatings lead to the formation of defects on the treated surfaces, reducing the performance characteristics of these products. Analysis of the causes of the formation of chips and cracks on the surfaces of these products to be processed showed that the appearance of these defects is associated with thermal processes accompanying

*mechanical processing. At the same time, it is necessary to take into account the influence of the structural heterogeneity of the processed product layer on the mechanism for the nucleation and development of defects such as cracks under the influence of the thermomechanical processes accompanying the diamond-abrasive machining. An analytical model has been developed to determine the thermomechanical state of the working surface of a cylinder with a wear-resistant coating that has partial delamination areas during the deposition process. Tribo-corrosive studies of Ni / Ni-TiO<sub>2</sub>-based composite materials obtained by electrochemical deposition were carried out, which showed that for Ni coating, an increase in the depth and width of cracks is noticeable depending on the increase in load at a constant exposure time. At the same time, the profile of cracks for the Ni-TiO<sub>2</sub> coating does not change with increasing load and constant time. The rational processing modes of the cylindrical group, the characteristics of the instrument, taking into account hereditary defects during coating, that provide the required quality, were selected.*

*Keywords: reliability, durability, tribocorrosion. wear resistance, delamination, thermomechanical processes, diamond abrasive processing.*

### Введение

Анализ литературных источников по трибологии показал, что за полный цикл эксплуатации машин эксплуатационные расходы в несколько раз превышают затраты на изготовление новой техники. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4...5% национального дохода [1, 2, 3, 4].

Повышение долговечности машин непосредственно связано с износостойкостью деталей машин. Таким образом, повышение износостойкости деталей машин является актуальным направлением исследований. Долговечность многих машин определяется износостойкостью деталей, имеющих внутренние цилиндрические поверхности, работающие в условиях трения скольжения [5, 6, 7, 8].

### Анализ последних исследований и публикаций

Известно, что задача повышения износостойкости конкретного изделия часто не предусматривает качественной модификации структурного состава используемого материала во всем его объёме, а переносится на видоизменение поверхностного слоя материала, поскольку защита сопрягаемых деталей от износа в ряде случаев решается поверхностным упрочнением. В общем случае под поверхностным упрочнением понимается повышение твёрдости поверхности и других механических характеристик [1, 3, 5, 9, 10].

Повышению механических характеристик трущихся поверхностей посвящено большое число работ, в результате которых предложены различные способы упрочнения. Перспективные направления развития поверхностно-упрочняющих технологий предполагают использование новых методов получения износостойких покрытий, в основном с использованием износостойких материалов, т.е. покрытий на основе соединений типа оксидов, нитридов и карбидов. Образование упрочняющих покрытий из разнородных материалов приводит не только к модификации поверхностного слоя, но и к образованию, в ряде случаев, принципиально нового композиционного материала поверхностного слоя, обладающего как высокой прочностью и достаточной пластичностью, так и повышенной износостойкостью [2, 3, 7, 11, 12].

### Цель работы

Исследование термомеханических процессов в изделиях с покрытием при их обработке и эксплуатации для определения условий образования дефектов отслоения покрытий от основного материала и их устранения с учётом физико-механического состояния поверхностного слоя, технологических параметров финишной обработки и наследственных дефектов, возникающих на операциях нанесения покрытий.

При поступательном движении поршня в цилиндре, имеющем некруглость  $\delta$  (или шероховатость  $R_a$ ) на участке  $(-\alpha; \alpha)$ , на его рабочей поверхности формируются участки частичного отслоения покрытия. Эти участки под действием рабочих касательных напряжений могут достигать таких значений при которых происходит отслаивание покрытия от матрицы цилиндрической поверхности.

### Изложение основного материала

Найдём при каких параметрах отслоения, связанных с шероховатостью рабочей поверхности цилиндра и его геометрической погрешности, а также физико-механических свойствах покрытия и материала цилиндра, происходит разрушение собственно покрытия.

Расчётная схема по определению напряженно-деформированного состояния системы цилиндр-покрытие следующая (рис. 1).

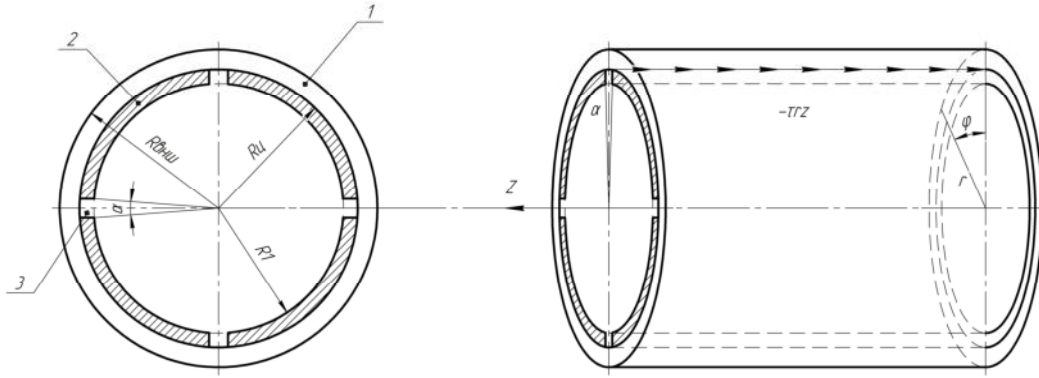


Рис. 1: Расчётная схема по определению напряженно-деформированного состояния: 1 – тело цилиндра; 2 – тело покрытия; 3 – участки отсутствия (отслоения) покрытия

Обозначим через  $U_z^{(i)}, U_r^{(i)}, U_\phi^{(i)}$  перемещения точек системы цилиндр-покрытие в направлении соответствующих координат цилиндрической системы  $(z, r, \phi)$ . Так как под действием технологических напряжений сцепления  $\tau_{rz}$  в системе 1 – 2 отличными от нуля будут перемещения  $U_z(r, \phi)$ , то уравнения Ламэ запишутся в виде:

$$\mu^{(i)} \nabla^2 U_z^{(i)} = \mu^{(i)} \left( \frac{\partial^2 U_z^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_z^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_z^{(i)}}{\partial \phi^2} \right) = 0. \quad (1)$$

Или  $U_z(r, \phi) = W(r, \phi)$ ,  $0 \leq r \leq R_1$ ,  $-\pi \leq \phi \leq \pi$  уравнение (1) примет вид:

$$\Delta W(r, \phi) = \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \phi^2} = 0. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\tau_{rz}|_{z=R_2} = 0, \quad (3)$$

$$\tau_{rz}(R_1 - 0, \phi) = \tau_{rz}(R_1 + 0, \phi) = -\tau_{сц}, |\phi| \leq \alpha. \quad (4)$$

Условия на дефекте:

$$W(R_1 - 0, \phi) - W(R_1 + 0, \phi) = \begin{cases} \chi(\phi), & -\alpha \leq \phi \leq \alpha \\ 0, & |\phi| > \alpha \end{cases}. \quad (5)$$

Условия неразрывности касательных напряжений на границе цилиндр-покрытие:

$$\begin{aligned} \tau_{rz}(R_1 - 0, \phi) &= G_1 \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r=R_1-0}; \quad \tau_{rz}(R_1 + 0, \phi) = G_2 \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r=R_1+0}, \\ \tau_{rz}(R_1 - 0, \phi) - \tau_{rz}(R_1 + 0, \phi) &= G_1 \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r=R_1-0} - G_2 \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r=R_1+0} = \\ &= G_1 < W'(R_1, \phi) > - (G_2 - G_1) \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{R_1} = 0. \end{aligned}$$

Из последнего выражения получим:

$$< W'(R_1, \phi) > \geq h W'(R_1 + 0, \phi), h = \frac{G_2 - G_1}{G_1}. \quad (6)$$

Уравнения (1) – (6) составляют антиплоскую задачу для системы цилиндр-покрытие с учётом дефекта типа отслоения, которое возникает из-за шероховатости рабочей поверхности цилиндра или его некруглости.

Для решения задачи (1) – (6) использованы конечные преобразования Фурье [13] по переменной  $\phi$ , определяемое формулами:

$$\begin{aligned} W_n(r) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-in\phi} W(r, \phi) d\phi, W(r, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\phi} W_n(r), \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W^{(k)}(r, \phi) e^{-in\phi} d\phi &= (in)^k W_n(r). \end{aligned} \quad (7)$$

Получим одномерную разрывную краевую задачу:

$$L_2[W_n(r)] = rW_n''(r) + W_n'(r) - \frac{n^2}{r}W_n(r) = 0. \quad (8)$$

с краевыми условиями:

$$W_n(0) = A < \infty, W_n'(R_2) = 0, \quad (9)$$

условиями на дефекте:

$$W_n(R_1 - 0) - W_n(R_1 + 0) \leq W_n(R_1) \geq \chi_n, \quad (10)$$

и условиями неразрывности касательных напряжений при переходе через границу системы цилиндр-покрытие:

$$\langle W_n'(R_1) \rangle \geq hW_n'(R_1 + 0). \quad (11)$$

Для построения решения разрывной краевой задачи (8) – (10) — введём в рассмотрение базисную систему решений дифференциальных уравнений, которая представляет собой дифференциальное уравнение Эйлера и решение которого имеет вид:

$$W_n(r) = c_1 y_1 + c_2 y_2 = c_1 r^n + c_2 r^{-n}$$

Решение разрывной задачи можно получить в виде [13, 14]:

$$W_n(r) = \int_0^{R_2} G(r, \rho) f(\rho) d\rho + \sum_{j=0}^1 r_j W_{n,j}(r), \quad (12)$$

В рассматриваемой задаче практический интерес представляет коэффициент интенсивности напряжений (КИН) на краях отслоения при  $\phi = -\alpha - 0$  и при  $\phi = \alpha + 0$ , то есть

$$K_{III}^- = \lim_{\phi \rightarrow -\alpha - 0} \sqrt{2\pi(-\alpha - \phi)} \tau_{rz}(R_1, \phi), \quad (13)$$

$$K_{III}^+ = \lim_{\phi \rightarrow \alpha + 0} \sqrt{2\pi(\phi - \alpha)} \tau_{rz}(R_1, \phi). \quad (14)$$

Или с учётом замены  $\phi = \alpha\phi'$  и симметрии эти соотношения примут вид [14, 13]:

$$K_{III}^\mp = \lim_{\phi' \rightarrow \mp 1 \mp 0} \sqrt{2\pi\alpha(\mp 1 \mp \phi')} \tau_{rz}(R_1, \alpha\phi')$$

и при этом [11]:

$$\tau_{rz}(R_1, \alpha\phi') = \frac{-(h+1)G_1}{2\pi^2(2+h)\alpha} \times \times \frac{d^2}{d\phi'^2} \int_{-1}^1 X(\alpha\phi') \left[ \ln \frac{1}{|\phi' - \psi'|} + R'^2(\alpha\phi', \alpha\psi') \right] d\psi'. \quad (15)$$

Используя корреляционную связь шероховатости рабочей зоны цилиндра с величиной  $(-\alpha, \alpha)$  участка отслоения покрытия при различных финишных операциях: шлифовании (чистовом и финишном), полировании найдём зависимость КИН  $K_{III} = f(\alpha)$  (рис. 2).

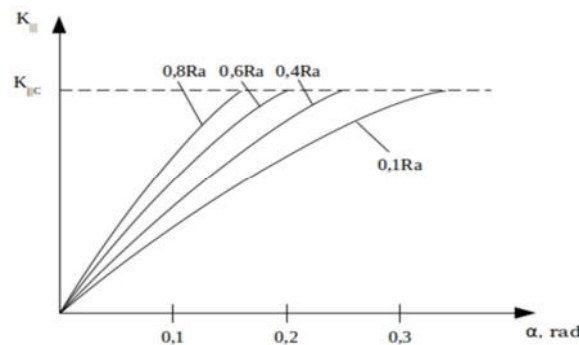


Рис. 2: Зависимость КИН от угла отслоения  $\alpha$  и шероховатости рабочей зоны цилиндрической поверхности  $Ra$

Для этого, по формулам (13) и (15) по заданным значениям  $\tau_{sc}$  прочности сцепления покрытия с цилиндрической поверхностью находим расчётные значения  $K_{III}$  в зависимости от величины дефекта  $(-\alpha, \alpha)$  отслоения при различных значениях шероховатости рабочей поверхности инструмента (рис. 2).

#### Результаты

Для обеспечения требуемой надёжности и долговечности цилиндрической группы с покрытием необходимо при нанесении покрытий на их рабочих поверхностях обеспечить шероховатость  $0,8 \leq R_a \leq 1,2$ . Такую шероховатость можно достичь за счёт операций финишного шлифования и последующего отделочного полирования. При этом математическое ожидание участка отслоения  $M(\alpha)$  будет находиться в рамках возможностей технологического процесса нанесения покрытия при которых будет сохраняться равновесное состояние участка отслоения при действии технологических напряжений.

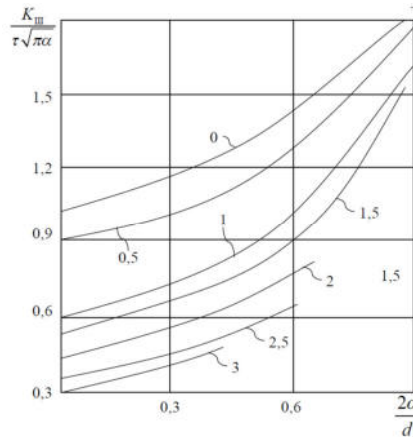


Рис. 3: Зависимость КИН  $K_{III} / \tau \sqrt{\pi \alpha}$  при продольном сдвиге

Учёт зависимости КИН от относительного расстояния между участками отслоения показан на рис. 3. С увеличением расстояния  $d$  коэффициент  $2\alpha/d$ , уменьшается и интенсивность напряжений может достигать больших значений не нарушая равновесного состояния участков отслоения.

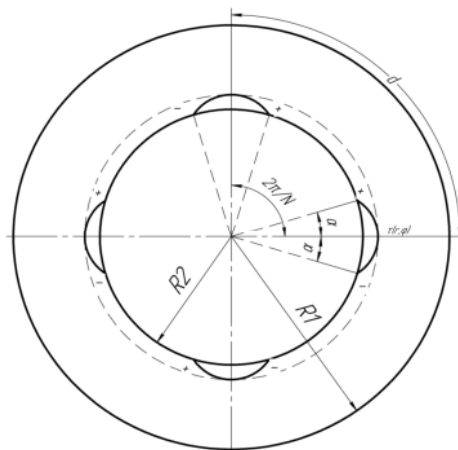


Рис. 4: Расчётная схема по исследованию взаимного влияния участков отслоения на интенсивность напряжений  $K_{III}$

В случае когда из-за шероховатости рабочей поверхности цилиндра имеют место система участков отслоений покрытия от матрицы цилиндра (рис. 4) возможно изменение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{III}$  из-за их взаимного влияния и условий эксплуатации [15].

Для подтверждения вышеописанной аналитической модели были проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO<sub>2</sub> полученные методом электрохимического осаждения.

После проведения трибокоррозионных исследований материалов Ni/Ni-TiO<sub>2</sub> определено, что для покрытия Ni заметно увеличение глубины и ширины трещин в зависимости от увеличения нагрузки при неизменном времени воздействия. При этом профиль трещин для покрытия Ni-TiO<sub>2</sub> с увеличением нагрузки и неизменным временем не меняется. В связи с этим можно выделить положительное влияние частиц TiO<sub>2</sub> в покрытии, которые увеличивают защитные функции покрытия от механического истирания, при этом величина нагрузки для Ni-TiO<sub>2</sub> перестаёт играть столь существенную роль (рис. 5: а, б) [16].

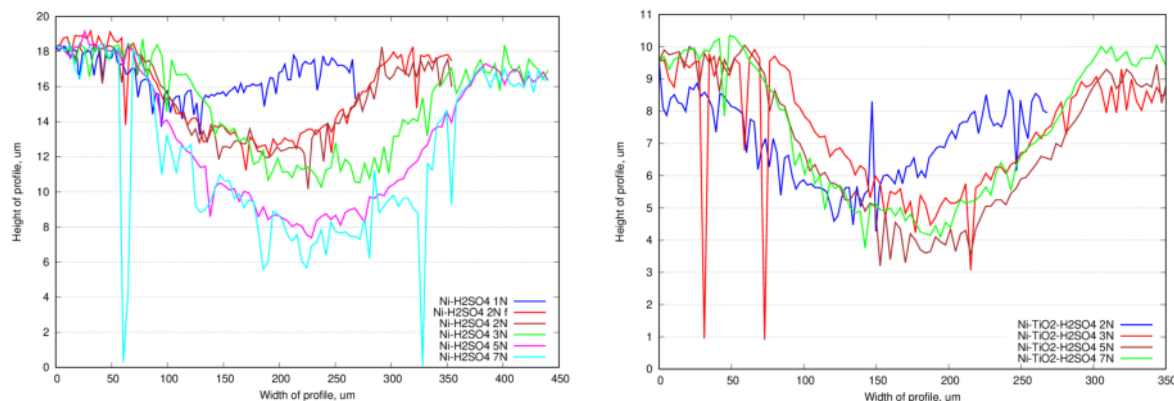


Рис. 5: Влияние частиц на износостойкость покрытия осаждённого электрохимическим методом: а) покрытие из никеля, б) покрытие Ni-TiO<sub>2</sub>

Адекватность построенной модели проверялась экспериментально на образцах из дуплексной стали (duplex 2463), на поверхность которых осаждалось методом электрохимического осаждения износостойкое покрытие на основе Ni-TiO<sub>2</sub> толщиной равное 0,4 – 0,6 мм. Для расчёта параметров бездефектной обработки были использованы следующие физико-механические характеристики:  $K_C = 2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ;  $\alpha = 8,58 \text{ К}^{-1}$ ;  $G = 168 \text{ Гпа}$ .

Учитывая случайность размера и распределение дефектов в теле, необходимо установить закон вероятностного распределения этих дефектов. По результатам анализов микрошлифов рабочих поверхностей исследуемых образцов, до операции шлифования, находилась функция распределения размеров дефектов, определяющая для каждого значения относительную частоту  $n/m$  появления этого размера в зоне контакта круга с деталью ( $n_i$  — сумма частот размеров  $l_i$ , попавших в  $i$ -й интервал,  $m$  — длина частичного интервала).

Экспериментальные исследования распределения дефектов — воздушных пор показали, что функция дефектов удовлетворяет нормальному распределению (рис. 6).

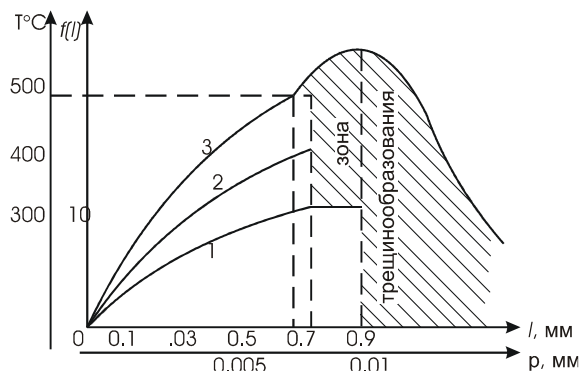


Рис. 6: Расчетно-экспериментальные значения предельных размеров трещиноподобных дефектов при шлифовании износостойких покрытий на основе Ni-TiO<sub>2</sub> покрытиями кругами: 1 — круг алмазный АСР Б1 зернистого 100/80; 2 — круг из синтетических алмазов АСК 250/200 МО 16 100 %; 3 — круг электрокорундовый 24А 25 СМ/8К5.

Вероятность разрушения вычислялась в предположении, что отдельные воздушные поры не взаимодействуют друг с другом. По существу, на основе гипотезы «наиболее слабого звена».

Для проверки критерия отсутствия шлифовочных трещин на обрабатываемой поверхности определялась контактная температура в зоне шлифования. С учётом того, что доминирующим фактором из режимов шлифования, влияющим на теплонапряженность процесса шлифования, является  $h$  — глубина шлифования, была найдена зависимость  $T = f(h)$ . Остальные режимы выбирались из условий максимальной производительности с сохранением требуемого качества. Так, при шлифовании покрытия кругами алмазными АСРБ1 зернистостью 100/80 (кривая 1), кругами из синтетических алмазов АСК 250/200 МО 16 100 % (кривая 2), кругами из электрокорунда 24А25СМ18К5 (кривая 3) остальные режимы шлифования выбирались следующими:  $V_g = 0,17 \text{ м/с}$ ;  $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$ ;  $S_{non} = 5 \text{ мм}$ .

Экспериментальные исследования показали, что круги из природных и синтетических алмазов обладают стабильной режущей способностью, высокой размерной стойкостью, имеют сравнительно



низкую температуру в зоне шлифования, что сказывается и на отсутствии трещин при больших глубинах шлифования (по сравнению с кругами 24A25CM18K5) [12].

Было установлено, что наиболее производительно при сохранении требуемого качества шлифование покрытия кругами алмазными АСРБ1 зернистостью 100/80 (кривая I, рис. 6).

Так как пористость (величина и плотность) при электрохимическом осаждении данного покрытия регулируется скоростью осаждения и свойствами покрытия, а также другими параметрами процесса осаждения, можно соответствующим подбором режимов шлифования и характеристик кругов избежать появления шлифовальных трещин на рабочей поверхности цилиндров с покрытием.

Результаты изучения микротвердости обработанной поверхности и микроструктуры поверхностного слоя свидетельствуют о том, что в диапазоне исследованных режимов структурные изменения после шлифования износостойкого покрытия Ni-TiO<sub>2</sub> отсутствуют.

Характер трещинообразования покрытий в зависимости от характеристик кругов, режимов резания можно проследить используя критерий предельного теплового потока  $q^*$ . Тепловой поток, поступающий в деталь при шлифовании является не только функцией режимов резания —  $V_g$ ,  $V_{кр}$ ,  $t_{шл}$ ,  $P_z$ , но и характеристик кругов — твёрдости, вязкости, зернистости свойств режущих зёрен, их твёрдости и др. Поэтому следует ожидать, что для каждого круга имеется своё значение предельного теплового потока при котором покрытия, содержащие дефекты размером  $2l$ , не будут подвержены трещинообразованию [9, 11, 12, 17].

### Выводы

Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием, имеющим участки частичного отслоения в процессе нанесения. Проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO<sub>2</sub> полученных методом электрохимического осаждения. Представлено технологическое обеспечение качества финишной обработки цилиндрических поверхностей с износостойкими покрытиями на основе Ni-TiO<sub>2</sub> путём рационального выбора режимов обработки, характеристик инструмента с учётом наследственных дефектов при нанесении покрытия

### Список использованной литературы

1. СТП МДВ 04.87. Покрытия износостойкие. Технология нанесения вакуумно-плазменным способом. Стандарт предприятия. Харьков, 1987. □ 40 с.;
2. Сторожев В. П. Причины и закономерности постепенных отказов основных триботехнических объектов энергетической системы судна и повышение их ресурса : дис ... д-ра техн. наук: 05.02.02. Одесса, 2002. 381 с.;
3. Левченко А. А., Евдокимов В. Д. Влияние технологической наследственности при производстве запасных частей на наводораживание деталей и их износостойкость. *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*. □ 2006. № 2. □ С. 23 – 28;
4. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин : монография. Москва : Издательство МСХА, 2003. 343 с.;
5. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. *Journal of Engineering for Industry*. 1986. 108, № 4. P. 247 – 251;
6. Балохонов Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах : монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.;
7. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings. *Materials Chemistry and Physics*. 2014. T. 145, №. 3. P. 476 – 483;
8. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. T. 468, №. 1 – 2. P. 546 – 552;
9. Усов А. В. Математическое моделирование процессов контроля покрытия элементов конструкций на базе СИУ. *Проблеми машиностроения*. 2010. T. 13, № 1. С. 98 – 109;
10. ASTM B254-92(2014). Standard Practice for Preparation of and Electroplating on Stainless Steel. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014;
11. Оборский Г. А., Дашенко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем : монография. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.;
12. Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В. Теплофизика механической обработки. Киев: Лыбидь, 1991. 240 с.;
13. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва: Физматгиз, 1961. 1020 с.;
14. Попов Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов разрезов тонких включений и подкреплений. Москва: Наука, 1982. 344 с.;
15. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие: В 4 т. / под общей ред. Панасюка В. В. Киев: Наук. думка, 1988.

16. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of NI-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2017. вип. 12. С. 61 – 70.
17. Паркус Г. Неустойчивые температурные напряжения / пер. с нем. под ред. Г. С. Шапиро. Москва: Физматлит. 1963. 252 с.

#### References

1. STP MDV 04.87. Wear resistant coatings. Vacuum-plasma application technology. Enterprise standard. Harkov, 1987. 40 p.;
2. Storozhev V. P. Causes and patterns of gradual failures of the main tribological objects of the ship's energy system and increase of their resource : dis ... d-ra tehn. nauk: 05.02.02. Odessa, 2002. 381 p.;
3. Levchenko A. A., Evdokimov V. D. The influence of technological heredity in the production of spare parts on hydrogenation of parts and their wear resistance. *Problemi tehniki: Naukovo-virobnichiy zhurnal*. 2006. № 2. □ P. 23 – 28;
4. Garkunov D. N., Kornik P. I. Types of friction and wear. Operational damage to machine parts : monografiya. Moskva : Izdatelstvo MSHA, 2003. 343 p.;
5. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. *Journal of Engineering for Industry*. 1986. 108, № 4. P. 247 – 251;
6. Balohonov R. R. Surface layers and internal interfaces in heterogeneous materials : monografiya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2006. 520 p.;
7. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings. *Materials Chemistry and Physics*. 2014. T. 145, №. 3. P. 476 – 483;
8. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. T. 468, №. 1 – 2. P. 546 – 552;
9. Usov A. V. Mathematical modeling of control processes for the coating of structural elements based on SIE. *Problemy mashinostroeniya*. 2010. Vol. 13, № 1. P. 98 – 109;
10. ASTM B254-92(2014). Standard Practice for Preparation of and Electroplating on Stainless Steel. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014;
11. Oborskiy G. A., Daschenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. System modeling : monografiya. Odessa: Astroprint, 2013. 664 p.;
12. Yakimov A. V., Slobodyanik P. T., Usov A. V. Thermal physics machining. Kiev: Lyibid, 1991. 240 p.;
13. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. Tables of integrals, sums, series and products. Moskva: Fizmatgiz, 1961. 1020 p.;
14. Popov G. Ya. Concentration of elastic stresses near the dies of cuts of thin inclusions and reinforcements. Moskva: Nauka, 1982. 344 p.;
15. Fracture mechanics and strength of materials: sprav. posobie: in 4 vols. / pod obschey red. Panasyuka V. V. Kiev: Nauk. dumka, 1988.
16. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of NI-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. 2017. Vol. 12. P. 61 – 70.
17. Parkus G. Unsteady temperature stresses / per. s nem. pod red. G. S. Shapiro. Moskva: Fizmatlit. 1963. 252 p.

УДК 539.3

Н.О. ЯРЕЦЬКА

Хмельницький національний університет

### ПРОСТОРОВА КОНТАКТНА ЗАДАЧА ПРО ТИСК ПРУЖНОГО КІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ НА ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИЙ ПІВПРОСТІР

*В рамках лінеаризованої теорії пружності представлено розв'язок контактної задачі про тиск пружного кільцевого штампа з початковими напруженнями на попередньо напружений півпростір без урахування сил тертя. Дослідження представлено у загальному вигляді для теорії великих початкових деформацій і двох варіантів теорії малих початкових деформацій при довільній структурі пружного потенціалу для рівних коренів визначального рівняння. Числова реалізація методу дала змогу графічно відобразити вплив початкових напружень на закон розподілу контактних характеристик тіл, для потенціалів найпростішої структури.*

*Ключові слова:* лінеаризована теорія пружності, початкові (залишкові) напруження, контактна задача, кільцевий штамп, півпростір.

Н.А. ЯРЕЦКАЯ

Хмельницкий национальный университет

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О ДАВЛЕНИИ УПРУГОГО КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА С НАЧАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

*В рамках линеаризованной теории упругости представлено решение контактной задачи о давлении упругого кольцевого штампа с начальными напряжениями на предварительно напряженное полупространство без учета сил трения. Исследование представлено в общем виде для теории больших начальных деформаций и двух вариантов теории малых начальных деформаций при произвольной структуре упругого потенциала для равных корней разрешающего уравнения. Численная реализация метода дала возможность графически отобразить влияние начальных напряжений на закон распределения контактных характеристик тел для потенциалов наипростейшей структуры.*

*Ключевые слова:* линеаризованная теория упругости, начальные (остаточные) напряжения, контактная задача, кольцевой штамп, полупространство.

N.A. YARETSKA

Khmelnytsky National University

### SPATIAL CONTACT PROBLEM OF PRESSURE OF THE ELASTIC ANNULAR PUNCH WITH INITIAL STRESSES ON THE PRE-STRESSED SEMI-SPACE

*The article is devoted to the study of the contact interaction of a pre-stressed annular stamp and a half-space with initial stresses without taking friction forces into account. The problem is solved for the case of equal roots of the resolving equation. The study is presented in a general form for the theory of large initial (finite) deformations and two versions of the theory of small initial deformations in the framework of the linearized theory of elasticity for an arbitrary structure of the elastic potential.*

*There is assumed that the initial states of the elastic annular stamp and the elastic half-space remain homogeneous and equal. The study is carried out in the coordinates of the initial deformed state, which are interrelated with Lagrange coordinates (natural state). In addition, the influence of the annular stamp causes small perturbations of the basic elastic deformed state.*

*Also, it is assumed that the elastic annular stamp and the elastic half-space are made of different isotropic, transversal-isotropic or composite materials.*

*Numerical analysis is presented by the form of graphs and tables of contact stresses and displacements of a potential for a harmonic type. The algorithm for solving this problem is implemented in the form of a computer program (Maple 17).*

*The influence of the initial stress on the contact interaction between the elastic annular stamp and the elastic half-space of the potentials of a particular structure is investigated.*

*The value of the studies carried out is that taking into account the influence of the initial stresses in the bodies on the law of distribution of the contact characteristics of elastic bodies at the points of their interaction can allow us to take into account, more effectively, the wear resistance of materials by properly estimating their*

*strength reserves. Also, it can sufficiently reduce their material consumption, while retaining the necessary functional characteristics of materials.*

*Consequently, the observed effect of the initial stresses is significant and must be taken into account when calculating the strength in structural details.*

*Key words: the linearized elasticity theory, initial (residual) stresses, contact problem, annular punch, half-space.*

### Постановка проблеми

Просторові контактні задачі є важливим розділом механіки деформованого твердого тіла, які формують теоретичну основу для розрахунків на контактну міцність, жорсткість і зносостійкість рухомих і нерухомих з'єднань.

Одним із важливих чинників контактної взаємодії тіл є вплив початкових напружень. Незважаючи на істотне досягнення в розвитку контактних задач, все ж питання впливу початкових напружень на контактну взаємодію пружних тіл залишилося майже повністю неопрацьованим до останнього часу. Як відомо, практично у всіх елементах конструкції присутні початкові напруження. Останні можуть бути викликані різного роду причинами, наприклад технологічними процесами, що супроводжують виготовлення цілого ряду матеріалів або складанням конструкції. У випадку композиційних матеріалів початкові напруження, як правило, відповідають напруженням уздовж армуючих елементів. У земній корі вони утворюються за рахунок дії гравітаційних сил і технічних процесів. Їх необхідно враховувати при розв'язуванні задач, які пов'язані із деформацією ґрунтів (особливо мерзлих). Крім цього, у пружно-пластичних тілах також можуть бути присутні внутрішні залишкові напруження після зняття навантаження.

Тому розробка ефективних методів розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням початкових напружень є актуальною і важливою науково-технічною проблемою.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні стосовно проблем, що мають відношення до контактної взаємодії пружних тіл, отримані результати із широкого кола питань. Вони представлені роботами [1–4]. Існує також ряд узагальнюючих публікацій [5], які повністю або частково пов'язані з тематикою даного дослідження. Незважаючи на істотні досягнення, кількість досліджень із контактної взаємодії попередньо напружених тіл є відносно малою.

Досить детальний огляд робіт пов'язаних із контактним тиском жорстких штампів (у тому числі і кільцевих) у разі відсутності початкових напружень наведено в монографії [5].

Дослідження контактної взаємодії жорстких і пружних штампів із попередньо напруженими тілами представлені в [1–4]. Причому розглядаються або пружні потенціали конкретної структури, або завдання ставиться в загальному вигляді для стислих (нестислих) тіл із потенціалом довільної структури на основі лінеаризованої теорії пружності.

У роботі [2] розглянуто розв'язок осесиметричної контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампа складної конфігурації на пружний шар з початковими напруженнями. Вплив початкових напружень на контактну взаємодію жорсткого кільцевого штампа на пружний півпростір з початковими напруженнями представлено в роботі [6].

### Мета дослідження

1) У рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями [1] представити постановку та розв'язок задачі про тиск попередньо напруженого кільцевого штампа на півпростір з початковими напруженнями без урахування сил тертя для рівних коренів визначального рівняння [1];

2) Дослідження виконати у загальному вигляді для стислих і нестислих тіл для теорії великих початкових деформацій і двох варіантів теорії малих початкових деформацій при довільній структурі пружного потенціалу;

3) Отримати числові та графічні результати досліджень для потенціалу гармонічного типу, а також зробити висновки про вплив початкових напружень на контактну взаємодію тіл.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Нехай скінченний попередньо напружений кільцевої штамп з плоскою основою, геометрична вісь симетрії якого збігається з віссю  $u_3$  циліндричної системи координат  $(r, \theta, u_3)$ , спрямована усередину півпростору (рис.1) і тисне на півпростір з силою  $P$ , після виникнення там початкового деформованого стану.  $R_1, R_2$  – внутрішній і зовнішній радіуси штампа, відповідно. Будемо вважати, що зовнішнє навантаження прикладене тільки до вільного торця пружного штампа. Під дією навантаження всі точки торця штампа переміщуються у напрямку осі симетрії  $u_3$  на одну і ту ж величину  $\varepsilon$ . Будемо вважати, що поверхні поза областю контакту залишаються вільними від впливу зовнішніх сил, а у зоні контакту переміщення і напруження – неперервні.

Будемо розрізняти такі стани тіл з початковими напруженнями: природний, початковий та збурений. Всі величини, останнього, складаються із суми величин початкового стану та відповідних збурень. Оскільки збурення вважаємо меншими відповідних величин початкового стану, дослідження проводимо в рамках лінеаризованої теорії пружності [1].

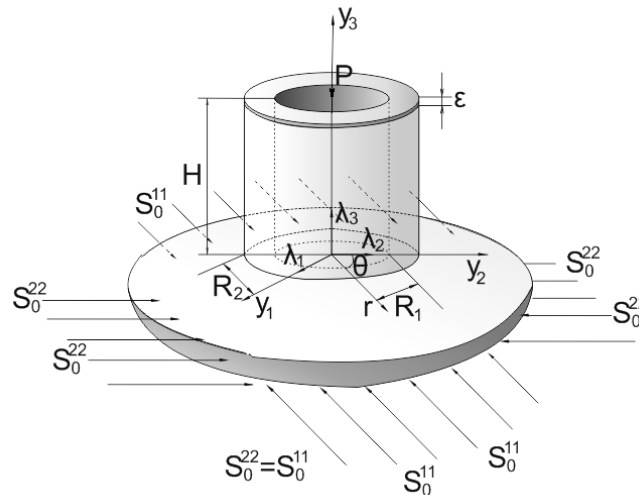


Рис. 1. Тиск попередньо напруженого кільцевого штамп на півпростір з початковими напруженнями.

Для дослідження застосуємо координати початкового деформованого стану  $(y_1, y_2, y_3)$ , які пов'язані з лагранжевими координатами  $(x_1, x_2, x_3)$  співвідношеннями:  $y_i = \lambda_i x_i$ . Тут  $\lambda_i$  ( $i=1,2,3$ ) – коефіцієнти видовження, які визначають переміщення початкового стану. Вісь  $y_3$  спрямована по нормалі до області контакту.

Припустимо, що початкові стани контактуючих тіл – однорідні та рівні, а пружні потенціали – двічі неперервно-диференційовані функції алгебраїчних інваріантів тензора деформацій Гріна [1]. Матеріали тіл, вважаємо ізотропним стисливими або нестисливими з довільною структурою пружного потенціалу.

Величини, які відносяться до пружного штамп, будемо записувати із верхнім індексом (1), а величини, які відносяться до пружного півпростору – із верхнім індексом (2).

У системі кругових циліндричних координат  $(r, \theta, z_1)$ , де  $z_1 = v_1^{-1} y_3$ ,  $v_1 = \sqrt{n_1}$ ,  $n_1 = n_2$  – корені визначального рівняння [1], даній постановці відповідають граничні умови:

- 1) На торці пружного кільцевого штамп  $z_1 = v_1^{-1} H$ :

$$U_3^{(1)} = -\varepsilon, \quad Q_{3r}^{(1)} = 0 \quad (R_1 < r < R_2) \quad (1)$$

- 2) На межі пружного півпростору в області контакту  $z_1 = 0$ :

$$U_3^{(1)} = U_3^{(2)}, \quad Q_{33}^{(1)} = Q_{33}^{(2)}, \quad Q_{3r}^{(1)} = Q_{3r}^{(2)} = 0, \quad (R_1 < r < R_2) \quad (2)$$

- 3) На межі пружного півпростору поза областю контакту  $z_1 = 0$ :

$$Q_{33}^{(2)} = 0, \quad U_3^{(2)} = 0, \quad Q_{3r}^{(2)} = 0, \quad (0 < r < R_1, R_2 < r < \infty) \quad (3)$$

- 4) На зовнішній бічній поверхні пружного кільцевого штамп  $r = R_2$ :

$$Q_{rr}^{(1)} = 0, \quad Q_{3r}^{(1)} = 0, \quad (0 < z_1 < H v_1^{-1}) \quad (4)$$

- 5) На внутрішній бічній поверхні пружного кільцевого штамп  $r = R_1$ :

$$Q_{rr}^{(1)} = 0, \quad Q_{3r}^{(1)} = 0, \quad (0 < z_1 < H v_1^{-1}) \quad (5)$$

Умова рівноваги, яка встановлює зв'язок між осадкою торця та рівнодіючою навантаження  $P$ :

$$P = -2\pi \int_{R_1}^{R_2} r Q_{33}^{(2)}(0, r) dr \quad (6)$$

Напружено-деформований стан у пружному кільцевому штампі у випадку рівних коренів  $n_1 = n_2$  будемо визначати за формулами:

$$\begin{aligned} U_r^{(1)} = & -\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 6\tilde{C}_0^{(k)} r \left( v_1^{-1} + 2z_1 \right) + \gamma_k v_1 I_1(v_1 \gamma_k r) \left[ \left( \tilde{A}_k + v_1 z_1 \tilde{B}_k \right) \gamma_k \cos(\gamma_k v_1 z_1) + \tilde{B}_k \sin(\gamma_k v_1 z_1) \right] - \right. \\ & \left. - \alpha_k J_1(\alpha_k r) \left[ \alpha_k v_1^{-1} \left( \tilde{S}_4(\alpha_k z_1) + v_1 z_1 \tilde{S}_5(\alpha_k z_1) \right) - \tilde{S}_3(\alpha_k z_1) \right] \right\} N_k \\ U_3^{(1)} = & \frac{\varepsilon}{R_1 - R_2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 12m_1 \tilde{C}_0^{(k)} z_1 v_1^{-1} \left( v_1^{-1} + z_1 \right) + (1 - m_2) v_1^{-1} \left[ \tilde{A}_0^{(k)} + 3\tilde{C}_0^{(k)} \left( r^2 - 2z_1^2 \right) \right] + \right. \\ & \left. + \gamma_k I_0(\gamma_k v_1 r) \left[ \left( \tilde{A}_k + v_1 z_1 \tilde{B}_k \right) m_1 \gamma_k \sin(\gamma_k v_1 z_1) + (1 - m_2) \tilde{B}_k \cos(\gamma_k v_1 z_1) \right] - \right. \end{aligned} \quad (7)$$



$$\begin{aligned}
& -\alpha_k n_1^{-1} J_0(\alpha_k r) \left[ m_1 \alpha_k \left( \tilde{S}_2(\alpha_k z_1) + z_1 v_1 \tilde{S}_3(\alpha_k z_1) \right) + (m_2 - 1) v_1 \tilde{S}_5(\alpha_k z_1) \right] N_k \\
Q_{33}^{(1)} = & C_{44} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 12 \tilde{C}_0^{(k)} \left[ (1+m_1) l_1 (v_1^{-1} + z_1) + (1+m_2) l_2 z_1 \right] + \gamma_k^2 v_1^2 I_0(\gamma_k v_1 r) \left[ (1+m_1) l_1 \gamma_k (\tilde{A}_k + \right. \right. \\
& \left. \left. + v_1 z_1 \tilde{B}_k) \cos(\gamma_k v_1 z_1) + (1+m_2) l_2 \tilde{B}_k \sin(\gamma_k v_1 z_1) \right] - \right. \\
& \left. - \alpha_k^2 J_0(\alpha_k r) \left[ (1+m_1) l_1 \alpha_k v_1^{-1} \left( \tilde{S}_4(\alpha_k z_1) + v_1 z_1 \tilde{S}_5(\alpha_k z_1) \right) + (1+m_2) l_2 \tilde{S}_3(\alpha_k z_1) \right] \right\} N_k \\
Q_{3r}^{(1)} = & C_{44} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ -6 \tilde{C}_0^{(k)} r (1+m_2) v_1^{-1} + \gamma_k^2 v_1 I_1(\gamma_k v_1 r) \left[ (1+m_1) \gamma_k (\tilde{A}_k + v_1 z_1 \tilde{B}_k) \sin(\gamma_k v_1 z_1) - \right. \right. \\
& \left. \left. - (1+m_2) \tilde{B}_k \cos(\gamma_k v_1 z_1) \right] + \right. \\
& \left. + \alpha_k^2 v_1^{-1} J_1(\alpha_k r) \left[ \alpha_k (1+m_1) \left( \tilde{S}_2(\alpha_k z_1) + v_1 z_1 \tilde{S}_3(\alpha_k z_1) \right) + (1+m_2) \tilde{S}_5(\alpha_k z_1) \right] \right\} N_k,
\end{aligned}$$

де  $\tilde{S}_4 = \tilde{E}_k ch(\alpha_k z_1) + \tilde{F}_k ch(\alpha_k z_1)$ ,  $\tilde{S}_5 = ch(\alpha_k z_1) + \tilde{M}_k sh(\alpha_k z_1)$ ,

$$\begin{aligned}
\tilde{A}_0^{(k)} = & \frac{v_1}{(R_1 - R_2)(1 - m_2)} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (1+m_2) f_1(R_1, R_2) + \frac{v_1 \theta_1 (I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2))}{R_1 + R_2} \right\} \gamma_k \tilde{B}_k, \\
\tilde{C}_0^{(k)} = & \frac{v_1}{3(R_2^2 - R_1^2)} \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2) \} \gamma_k \tilde{B}_k, \quad \theta_1 = \frac{4Hm_1(1+H)}{v_1^3} + \frac{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2}{3} - \frac{2H^2}{n_1}, \\
f_1(R_1, R_2) = & -R_1 I_0(\gamma_k v_1 R_1) + \frac{\pi R_1}{2} L_0(\gamma_k v_1 R_1) I_1(\gamma_k v_1 R_1) - \frac{\pi R_1}{2} L_1(\gamma_k v_1 R_1) I_0(\gamma_k v_1 R_1) + \\
& + R_2 I_0(\gamma_k v_1 R_2) - \frac{\pi R_2}{2} L_0(\gamma_k v_1 R_2) I_1(\gamma_k v_1 R_2) + \frac{\pi R_2}{2} L_1(\gamma_k v_1 R_2) I_0(\gamma_k v_1 R_2), \\
\tilde{S}_2 = & \tilde{E}_k sh(\alpha_k z_1) + \tilde{F}_k ch(\alpha_k z_1), \quad \tilde{S}_3 = sh(\alpha_k z_1) + \tilde{M}_k ch(\alpha_k z_1), \quad \tilde{M}_k = -cth(\alpha_k H v_1^{-1}), \quad \tilde{F}_k = -s_0 \alpha_k^{-1}, \\
\tilde{E}_k = & Hcth^2(\alpha_k H v_1^{-1}) - \tilde{F}_k cth(\alpha_k H v_1^{-1}) - H, \\
\tilde{A}_k = & (R s_0 H^2 (I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2)) (2n_1 (R_2^2 - R_1^2) I_1(\gamma_k v_1 R))^{-1} - s_0 (v_1 \gamma_k^2)^{-1} + 0.5H) \tilde{B}_k, \\
\tilde{B}_k = & 0.5 \alpha_k (R_2^2 - R_1^2) J_0(\alpha_k R) \{ H \alpha_k (\tilde{c}_0 sh(\alpha_k H v_1^{-1}) + \tilde{c}_1 (1 - ch(\alpha_k H v_1^{-1})) (1 - s_0 sh(\alpha_k H v_1^{-1}))) + \\
& + (1 - ch^2(\alpha_k H v_1^{-1})) (v_1 (\tilde{c}_0 + \tilde{c}_2 - \tilde{c}_1) - \tilde{c}_0 s_0) \} \gamma_k (ch^2(\alpha_k H v_1^{-1}) - 1) [H(1 - \tilde{c}_0 + H(3\tilde{c}_0 + 2\tilde{c}_2 - \\
& - 4\tilde{c}_1)) (I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2)) + \tilde{c}_2 n_1 (R_2^2 - R_1^2) I_0(\gamma_k v_1 R)] \}, \\
R = & (R_2 - R_1) H(r - R_1) - (R_2 - R_1) H(r - R_2) + \delta(R_1) (2R_1 - R_2) + \delta(R_1) R_2, \quad H(x) - \text{функція Хевісайда}, \\
\delta(x) - & \text{функція Дірака}, \quad L_v(x) - \text{модифікована функція Струвеля}, \quad J_v(x), I_v(x) - \text{функції Бесселя}.
\end{aligned}$$

Напружено-деформований стан пружного півпростору з початковими напруженнями для  $n_l = n_2$  визначимо через гармонійні функції у вигляді інтегралів Ханкеля. Задовольнивши умови (2) і (3) маємо:

$$U_3^{(2)} = -\frac{1}{\omega_3} \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_0(\eta r) d\eta, \quad U_r^{(2)} = \omega_1 \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_1(\eta r) d\eta, \quad Q_{33}^{(2)} = \frac{\omega_3}{R_2 - R_1} \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta, \quad Q_{3r}^{(2)} = 0, \quad (8)$$

де  $\omega_3 = C_{44} l_1 (1 + m_1) (s - s_0)$ ,  $\omega_1 = s_0 - 1$ ,  $s_0 = (1 + m_2) (1 + m_1)^{-1}$ ,  $s = s_0 l_2 l_1^{-1}$ .

У (8) значення коефіцієнтів  $n_b$ ,  $m_b$ ,  $c_{44}$ ,  $l_b$  подані в [1]. Використовуючи розв'язки для циліндра (7) і задовольнивши другим умовам (1), (4) і (5), знаходимо власні значення задачі (1) - (6):

$$\gamma_k = \pi(2k + 1)H^{-1}, \quad \alpha_k = \mu_k R^{-1} \quad (J_1(\mu_k) = 0) \quad (9)$$

З умов (2) і (3), визначимо невідому функцію  $F(\eta)$  для (8) із парних інтегральних рівнянь:

$$\int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_0(\eta \kappa) d\eta = f(r) \quad (R_1 < r < R_2), \quad \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta = 0 \quad (0 < r < R_1, R_2 < r < \infty), \quad (10)$$

$$\text{де } f(r) = \frac{\omega_3 \varepsilon}{R_2 - R_1} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\langle (\tilde{A}_0^{(k)} + 3r^2 \tilde{C}_0^{(k)}) \frac{1 - m_2}{v_1} + \gamma_k I_0(\gamma_k v_1 r) (1 - m_2) \tilde{B}_k - \frac{\alpha_k}{n_1} J_0(\alpha_k r) (m_1 \alpha_k \tilde{F}_k + v_1 (m_2 - 1)) \right\rangle N_k.$$

Застосовувавши формулу звернення [1] до (10) перейдемо відносно функції  $F(\eta)$  до інтегрального рівняння типу Фредгольма другого роду, тобто:



$$\frac{F(\eta)}{\eta} = \frac{2\omega_3}{\pi(R_2 - R_1)} \left\langle \varepsilon + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ (1+m_2)f_1(R_1, R_2) + \frac{I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2)}{R_2 + R_1} (v_1 \theta_1 - (1-m_2)(R_2^2 - R_1^2)) \gamma_k \tilde{B}_k \psi_0(\eta, 0) + \right. \right. \\ \left. \left. + (R_1 - R_2) \left\{ \gamma_k \psi_0(\eta, i \gamma_k v_1 (R_2 - R_1)) (1-m_2) \tilde{B}_k + \frac{\alpha_k}{n_1} \psi_0(\eta, \mu_k) ((1-m_2)v_1 - s_0 m_1) \right\} \right] N_k \right\rangle \quad (11)$$

де  $\psi_n(x, y) = \int_0^1 t^n \cos xt \cos ytdt$ .

Задовольнивши другу граничну умову (2), маємо:

$$\int_0^{\infty} \frac{F(\eta)}{\eta} (J_1(\eta R_2) - J_1(\eta R_1)) d\eta = C_{44} \sum_{k=1}^{\infty} \left\langle 2l_1(1+m_1) \gamma_k (I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2)) \tilde{B}_k + \gamma_k^2 v_1 l_1(1+m_1) (R_2 I_1(\gamma_k v_1 R_2) - \right. \\ \left. - R_1 I_1(\gamma_k v_1 R_1)) \tilde{A}_k - \alpha_k (R_2 J_1(\alpha_k R_2) - R_1 J_1(\alpha_k R_1)) \left( \frac{l_1}{v_1} (1+m_1) \alpha_k \tilde{E}_k + (1+m_2) l_2 \tilde{M}_k \right) \right\rangle N_k$$

Враховуючи перші дві умови (2), ортогональність бесселевих функцій  $J_0(\mu_k \rho)$  та значень деяких інтегралів [1] для визначення сталих  $N_i$  ( $i=0,1,2,\dots$ ), з (7) (8) і (10), отримаємо нескінченну систему алгебраїчних рівнянь:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \tau_{nk} X_n = \beta_k \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (12)$$

Коефіцієнти системи представимо у вигляді:

$$\tau_{kn} = \left\{ (1+m_2) f_1(R_1, R_2) + (I_0(\gamma_n v_1 R_1) - I_0(\gamma_n v_1 R_2)) (R_1 + R_2)^{-1} (v_1 \theta_1 - (R_2^2 - R_1^2) (1-m_2)) \right\} \gamma_n \tilde{B}_k + \\ + (R_1 - R_2) \left\{ \gamma_n \tilde{B}_k (1-m_2) \psi_0(0, i \gamma_n v_1 R_1) + \frac{\alpha_n}{n_1} \psi_0(0, \mu_n) ((1-m_2)v_1 + m_1 s_0) \right\} - \\ - C_{44} \left\{ 2(1+m_1) l_1 \gamma_n \tilde{B}_k (I_0(\gamma_n v_1 R_1) - I_0(\gamma_n v_1 R_2)) + \gamma_n^2 (1+m_1) l_1 v_1 (R_2 I_1(\gamma_n v_1 R_2) - \right. \\ \left. - R_1 I_1(\gamma_n v_1 R_1)) \tilde{A}_k - \alpha_n (R_2 J_1(\alpha_n R_2) - R_1 J_1(\alpha_n R_1)) ((1+m_1) l_1 v_1^{-1} \alpha_n \tilde{E}_k + (1+m_2) l_2 \tilde{M}_k) \right\}, \\ \beta_k = 2\omega_3 \varepsilon (\pi R_1 R_2)^{-1}$$

Використовуючи умову (6), встановимо зв'язок між осіданням і рівнодіючою навантаження  $P$  у вигляді:

$$P = - \frac{4\omega_3^2 \varepsilon}{(R_2 - R_1) R_2 R_1} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (I_0(\gamma_k v_1 R_1) - I_0(\gamma_k v_1 R_2)) (v_1 \theta_1 - (R_2^2 - R_1^2) (1-m_2)) \gamma_k - \right. \\ \left. - (1-m_2) v_1^{-1} sh(\gamma_k v_1 (R_2 - R_1)) \right\} \tilde{B}_k + v_1^{-1} \sin \mu_k ((m_2 - 1)v_1 - s_0 m_1) \left\} N_k.$$

Після визначення невідомих сталих  $N_i$  ( $i=0,1,2,\dots$ ) із (12), обчислимо переміщення та напруження як у пружному штампі, так і у пружному півпросторі за формулами (7), (8). В результаті цього, розв'язок представимо у вигляді рядів через нескінченну систему констант, які визначаються із системи лінійних алгебраїчних рівнянь (12). Причому у системі (12) коефіцієнти  $\beta_k$  та  $\tau_{kn}$  залежать від величин, що визначають структуру пружного потенціалу та висоти штампа  $H$ , а вільні члени залежать тільки від  $n_1, n_2$ .

Було проведено чисельне розв'язання системи (12) для гармонічного потенціалу (рис. 2, 3) при значеннях параметрів:  $R_1=1.0$ ,  $R_2=2.0$ ,  $\varepsilon=10^{-5}$ ,  $E=3.92$ ,  $\sigma=0.47$ ,  $\lambda_1=0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ , де  $R_1 < R_2$ . Алгоритм розв'язку поставленої задачі реалізований у вигляді комп'ютерної програми у пакеті Maple 17.

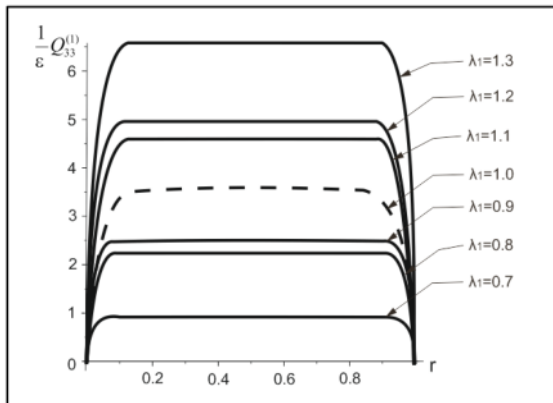


Рис. 2. Нормальные контактные напряжения.

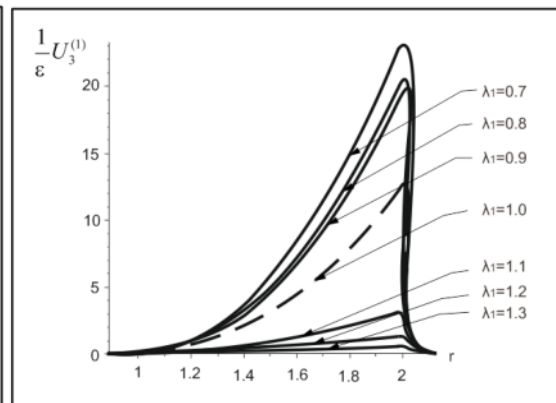


Рис. 3. Нормальные контактные перемещения.

На рис. 2, 3 представлені, відповідно, розподіли нормальних контактних напружень  $\varepsilon^{-1}Q_{33}$  та переміщень  $\varepsilon^{-1}U_3$  під кільцевим штампом у зоні контакту у безрозмірних координатах. Причому значенням коефіцієнтів видовження  $\lambda_1$  відповідають криві знизу до гори по зростанню  $\lambda_1$ . Пунктирні криві відповідають випадку відсутності початкових напружень ( $\lambda_1=1$ ), а суцільні – їх наявності.

На рис. 2 початок координат по осі  $r$  відповідає  $r=R_1$ . Із рис. 2, 3 бачимо, що початкові напруження при стисканні призводять до зменшення сили контактних, а при розтягненні – до їх збільшення.

Таблиця 1. Чисельні значення сили  $P/\varepsilon$ 

| Потенціал<br>гармонічного типу | $\lambda_1$     | 0,7    | 0,8    | 0,9    | <b>1</b>      | 1,1    | 1,2    |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|
|                                | $P/\varepsilon$ | 0,3458 | 0,4128 | 0,4401 | <b>0,4521</b> | 0,4567 | 0,4576 |

У Табл. 1 представлено співвідношення числових значень сили  $P$ , що діє на верхній торець пружного штампа, при заданих величинах початкових напружень із випадком відсутності початкових напружень. Випадок відсутності початкових напружень виділений у Табл. 1 жирним шрифтом.

#### Висновки

На основі чисельного аналізу можна побачити, що максимальні за модулем значення контактних переміщень (рис.3) досягаються в точках близьких до зовнішньої бічної сторони пружного кільцевого штампа в області контакту.

Крім цього можна помітити, що при постійному зовнішньому навантаженні зміна пружного потенціалу призводить до зміни характеру розподілу контактних напружень і переміщень під пружним кільцевим штампом. А вплив початкових напружень на напружено-деформований стан пружного півпростору, в який втискається пружний кільцевий штамп, полягає в наступному: 1) початкові напруження у півпросторі та штампі зменшуються у випадку стиску ( $\lambda_1<1$ ) та збільшуються при розтягуванні ( $\lambda_1>1$ ), що видно із рис. 2; 2) при стисканні ( $\lambda_1<1$ ) початкові напруження у півпросторі та штампі призводять до збільшення переміщень по абсолютній величині, а у випадку розтягування ( $\lambda_1>1$ ) – до їх зменшення; 3) при відсутності початкових напружень ( $\lambda_1=1$ ) отримані результати збігаються із класичними; 4) при постійному значенні осідання торця штампа  $\varepsilon$  для потенціалу гармонічного типу, присутність початкових напружень приводить до зменшення рівнодіючої навантаження  $P$  при стисканні ( $\lambda_1<1$ ), та її збільшення у випадку розтягування ( $\lambda_1>1$ ) (Табл.1).

#### Список використаної літератури

1. Гузь А.Н., Рудницький В.Б. Основы теории контактного взаимодействия упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями : монография. Хмельницький: вид. ПП Мельник, 2006. 710 с.
2. Шелестовський Б., Габрусєва І. Контактна взаємодія кільцевого штампа із попередньо напруженим півпростором. *Вісник ТДТУ*. 2009. № 3, т. 14. С. 48-53.
3. Діхтярук М.М., Ярецька Н.О. Контактна взаємодія нескінченного стрингера з однією та двома попередньо напруженими смугами. *Актуальні наукові дослідження в сучасному світі: збірник наукових праць*. 2018. №2(34), ч. 1. С. 75-83.
4. Yaretskaya N.A. Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses. *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50, №4. P. 378-388.
5. Гузь А.Н., Бабич С.Ю., Рудницький В.Б. Контактное взаимодействие упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями. *Развитие идей Л.А. Галина в механике*. 2013. 480 с.
6. Yaretskaya N. F. Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54, №5. P. 539 –543.
1. Guz A.N., Rudnitskiy V.B. Osnovy teorii kontaktnogo vzaimodeystviya uprugih tel s nachalnymi (ostatochnymi) napryazheniyami : monografiya. Hmel'niyskiy: vid. PP Mel'nik, 2006. 710 s.
2. Shelestovskiy B., Habrusieva I. Kontaktna vzaiemodiia kiltsevoho shtampa iz poperedno napruzhenym pivprostorum. *Visnyk TDTU*. 2009. № 3, t. 14. S. 48-53.
3. Dikhtiaruk M.M., Yaretska N.O. Kontaktna vzaiemodiia neskinchennoho strynhera z odniieiu ta dvoma poperedno napruzhenymy smuhamy. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom myre: sb. nauchnykh trudov*. 2018. №2(34), ch. 1. S. 75-83.
4. Yaretskaya N.A. Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses. *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50, №4. P. 378-388.
5. Guz A.N., Babich S.Yu., Rudnitskiy V.B. Kontaktnoe vzaimodeystvie uprugih tel s nachalnymi (ostatochnymi) napryazhenimi. *Razvitie idey L.A. Galina v mehanike*. 2013. 480 s.
6. Yaretskaya N. F. Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54, №5. P. 539 –543.

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 532.5

А.В. АМУРОВ, Ю.В. БРАЗАЛУК, А.И. ГУБИН, Д.В. ЕВДОКИМОВ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВОЛЮЦИИ  
ЖИДКОГО КОНТУРА**

*Исследование эволюции жидкого контура в потоке жидкости или газа рассматривается в работе как важная часть структурно-топологического анализа поля течения, имеющего целью поиск качественных и количественных закономерностей взаимодействия потока с обтекаемыми объектами, с твердыми и свободными границами области течения и с подвижными структурами, перемещающимися в потоке. Основное внимание в работе было уделено задачам внешнего обтекания в многосвязных неограниченных областях, однако отдельные случаи эволюции жидких контуров в ограниченных или полугораниченных областях также были включены в рассмотрение. Простоты ради, жидкость полагалась идеальной и несжимаемой, а течение вне вихревых структур и вдали от обтекаемых объектов и твердых стенок потока считалось потенциальным. Для численного расчета поля течения использовался метод граничных элементов в различных алгоритмических реализациях. Сама эволюция жидкого контура в поле скоростей, рассчитанном по методу граничных элементов, определяется в соответствии с лагранжевым принципом отслеживания движения жидких частиц. Было проведено несколько серий расчетов, иллюстрирующих применение предложенного подхода к рассматриваемой проблеме. Результаты работы могут представлять интерес не только в теоретической гидромеханике, но и во многих прикладных областях, например, вычислительной экологии.*

*Ключевые слова:* жидкий контур, потенциальное течение, вихревое течение, жидкие частицы, метод граничных элементов, лагранжевы методы

А.В. АМУРОВ, Ю.В. БРАЗАЛУК, О.І. ГУБІН, Д.В. ЄВДОКИМОВ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕВОЛЮЦІЇ РІДИННОГО КОНТУРУ**

*Дослідження еволюції рідинного контуру у потоці рідини чи газу розглядається в роботі як важлива частина структурно-топологічного аналізу поля течії, який має за мету пошук якісних і кількісних закономірностей взаємодії течії з об'єктами, що обтікаються, з твердими та вільними межами області течії та з рухомими структурами, що переміщуються у потоці. Головну увагу в роботі було приділено задачам зовнішнього обтікання у багатозв'язних необмежених областях, однак окремі випадки еволюції рідинних контурів в обмежених і напівобмежених областях також були включені до розгляду. Заради простоти, рідина вважалась ідеальною та нестисливою, а течія поза вихрових структур та вдалині від об'єктів, що обтікаються, та твердих стінок потоку вважалась потенціальною. Для чисельного розрахунку поля течії використовувався метод граничних елементів у різноманітних алгоритмічних реалізаціях. Сама еволюція рідинного контуру в полі швидкостей, розрахованому за методом граничних елементів, визначається у відповідності до лагранжевого принципу відстеження руху рідинних частинок. Було проведено декілька серій розрахунків, що ілюструють застосування запропонованого підходу до проблеми, яка розглядається. Результати роботи можуть представляти інтерес не тільки у теоретичній гідромеханіці, але і у багатьох прикладних областях, наприклад, обчислювальній екології.*

*Ключові слова:* рідинний контур, потенціальна течія, вихрова течія, рідинні частинки, метод граничних елементів, лагранжеві методи

A.V. AMUROV, Yu.V. BRAZALUK, O.I. GUBIN, D.V. YEVDOKYMOV

Oles Honchar Dnipro National University

**NUMERICAL INVESTIGATION OF LIQUID CONTOUR EVOLUTION PROCESS**

*A liquid contour evolution in fluid or gas flow is considered in the work as an important part of structural and topological analysis of the flow field, with an aim to find qualitative and quantitative patterns of the flow interaction with the objects flown around, with the solid and free flow domain boundary and with the structures moving inside the flow. The main attention of the work was given to external flow around problem;*

*however specific particular cases of liquid contour evolutions in restricted and semi-restricted domains also were included into the consideration. For the sake of simplicity, the fluid is assumed ideal and incompressible; the flow outside the vertical structures and far from solid walls of the stream is considered as potential. Boundary element method in different algorithmic implementations is used for numerical calculations of flow fields. A liquid contour evolution in the velocity field, calculated by boundary element method, is determined according a Lagrangian principle of liquid particle tracking. Several calculation serials were made to illustrate the proposed approach application to the considered problem. All calculations were performed for plane case to reduce necessary computer resources. Special attention was paid to an accuracy of the proposed numerical approach. Unfortunately, it is extremely difficult to obtain an analytical estimation for proposed computational scheme, because of its complexity. However, several tools for numerical experiment were proposed in the work, including comparison with high accurate calculations in particular cases of known analytical solutions for the flow field, direct and inverse calculations, checking of area bounded by the contour during the considered evolution. The results of the work can attract an interest not only in the theoretical fluid mechanics, but also for a lot of applied fields, for example, in computational ecology. The obtained results show, that the mathematical model of potential flow of ideal incompressible fluid can be enough useful for understanding of specific features of high Reynolds number flows.*

*Key words: liquid contour, potential flow, vortical flow, liquid particle, boundary element method, Lagrangian methods*

### Введение

В последние два-три десятилетия значительно вырос интерес к анализу топологии сложных течений как форме изучения качественных особенностей последних. Как правило, топология поля течения исследуется при помощи лагранжевых методов отслеживания перемещений подвижных объектов в потоке, например, вихревых структур, частиц дисперсной фазы и так далее. Вторым, не менее важным и даже более распространенным инструментом качественного анализа поля течения жидкости является визуализация поля при помощи линий тока (векторных линий поля скоростей). Наконец, третьим способом качественного анализа поля скоростей потока является отслеживание траекторий жидких частиц, которые в случае стационарного течения совпадают с линиями тока. При необходимости визуальная картина течения может быть дополнена картинками изотерм или изобар, характеризующих отдельные параметры течения. Однако качественное исследование поля течения в фазовом пространстве проводится крайне редко, и считается, что визуализации поля течения вместе с интегральными характеристиками потока, например, расходом, подъемной силой, силой сопротивления, вполне достаточно для описания и анализа поля течения.

Особое внимание следует обратить на связь задач эволюции объектов, движущихся в потоке, в том числе и жидких контуров, с лагранжевыми методами вычислительной гидромеханики. Изначально идеология лагранжевых методов заключалась в отслеживании движения малых объектов в потоке и получении информации об общих свойствах течения на основе анализа движения отслеживаемых объектов. Исторически начавшись с метода дискретных вихрей, предложенного А. Чориным и С.М. Белоцерковским, лагранжевы численные методы к настоящему времени значительно развились и помимо уже упомянутого метода дискретных вихрей включают метод дискретных особенностей, метод частиц и метод больцмановских решеток. Предметом рассмотрения настоящей работы классические лагранжевы методы не являются, хотя изложенный ниже подход весьма близок идейно со многими лагранжевыми методами до такой степени, что может быть классифицирован как лагранжев. Не останавливаясь на достоинствах и недостатках лагранжевых методов, отметим только их общеизвестные преимущества при анализе эффектов конвективного и адвективного переноса и относительную слабость при численном моделировании диффузионных процессов. Последнее утверждение очевидно означает, что чем больше соответствующие параметры, характеризующие соотношение конвективных и диффузионных членов в уравнениях переноса, входящих в математическую модель (число Рейнольдса, число Пекле), тем точнее оказываются лагранжевы методы. Откуда очевидно следует вывод о целесообразности применения лагранжевых методов в задачах перемешивания, распространения загрязнений, и, кроме того, в весьма широком спектре задач, где применима модель идеальной жидкости (асимптотически большие числа Рейнольдса).

Основным вычислительным аппаратом, используемым в настоящей статье, является метод граничных элементов, относящийся к вычислительной теории потенциала. Выбор этого семейства численных алгоритмов нуждается в особом обосновании. Дело в том, что из всех популярных методов вычислительной гидромеханики метод граничных элементов имеет самую узкую область эффективного применения. Однако метод граничных элементов оказывается весьма эффективен и, что особенно важно, исключительно точен для линейных задач гидромеханики. Собственно говоря, указанное требование линейности задач резко сужает поле эффективного применения метода, но высокая точность определения поля скоростей, предотвращающая быстрое накопление вычислительной погрешности в

многошаговом эволюционном процессе, заставляет прибегать именно к этому методу всякий раз, когда это оказывается возможным. Кроме того, псевдоаналитическое представление поля течения в методе граничных элементов позволяет определять скорость с высокой точностью в любой точке потока, а не только в узлах сетки, как в методе конечных разностей, что исключает при применении граничноэлементных алгоритмов любую дополнительную интерполяцию, порождающую трудноконтролируемую погрешность.

К сожалению, проблема перемещения ограниченного объема жидкости в потоке, и особенно в потоке сложной, многосвязной топологической структуры, не изучена еще теоретически надлежащим образом. В частности, не выяснено, имеются ли в движении такого объекта какие-либо инварианты помимо объема и массы объекта, что очевидно следует из несжимаемости жидкости. Хотя в цели настоящей работы не входит теоретический поиск подобных закономерностей, авторы надеются, что работа будет способствовать улучшению понимания данного вопроса.

Помимо описанного выше теоретического значения для современной гидромеханики настоящая работа представляет несомненный практический интерес для многих прикладных областей исследования. Так, например, в вычислительной экологии, если рассматриваемый жидкий контур охватывает зону загрязнения, то в ряде случаев с достаточной точностью можно считать, что эволюция жидкого контура определяет процесс пространственного переноса загрязнений. Вторым примером прикладного использования рассмотренного подхода является перемешивание перевозимых жидкостей в баках транспортных средств под действием вибраций, колебаний и других механических воздействий, которые претерпевает бак. Особый практический интерес с этой точки зрения представляет перемешивание топлива в топливных баках ракетно-космической техники на активном участке траектории. Исследование таких движений жидкости должно стать неотъемлемой частью проектирования и совершенствования транспортных средств. Практические приложения результатов настоящей работы, безусловно, повышают ее актуальность для развития современной техники и технологий.

### Постановка проблемы

Пусть в некоторой односвязной или многосвязной области  $D$  ( $D \in R^3$  в пространственном случае и  $D \in R^2$  в плоском), которую в дальнейшем будем называть областью течения или областью решения задачи, происходит движение несжимаемой жидкости в условиях, соответствующих применению одной из основных моделей современной гидромеханики. Пусть в результате этого течения в области  $D$  движется многообразие на 1 меньшей размерности  $\gamma(\tau, x, y, z)$ . Физические эффекты, связанные с данным многообразием, могут как оказывать, так и не оказывать влияние на поле скоростей потока. В дальнейшем, простоты ради, будем полагать, что такое влияние отсутствует, а это означает, что в потоке может быть выбрано какое угодно число контуров  $\gamma_i$ . Это также означает, что такие контуры, изначально связанные с некоторыми жидкими частицами, все время движения будут связаны с теми же жидкими частицами, перемещаясь со скоростью потока в этой точке. То есть

$$\begin{aligned}\frac{dx_\gamma}{d\tau} &= V_x(\tau, x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma), \\ \frac{dy_\gamma}{d\tau} &= V_y(\tau, x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma), \\ \frac{dz_\gamma}{d\tau} &= V_z(\tau, x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma)\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma$  - координаты произвольной точки, принадлежащей многообразию  $\gamma$ ,  $\tau$  - время,  $V_x, V_y, V_z$  - проекции вектора скорости среды в точке  $(x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma) \in \gamma$  на оси декартовой системы координат. Скорости жидкости  $V_x, V_y, V_z$  в данном случае определяются из решения соответствующих уравнений гидромеханики. Система дифференциальных уравнений (1) должна быть дополнена соответствующими начальными условиями, то есть, заданием многообразия  $\gamma(\tau=0)$  в начальный момент времени.

Отметим, что никаких ограничений на топологию самого многообразия  $\gamma$  не налагается, в том числе оно может быть как замкнутым топологически, так и незамкнутым. В первом случае, с рассматриваемым подвижным контуром во все время течения связана подобласть потока.

Очевидно, что система (1) по форме полностью совпадает с лагранжевым описанием движения частиц, которое положено в основу всех лагранжевых методов вычислительной гидромеханики. Именно это обстоятельство позволило классифицировать рассматриваемый подход как лагранжевый.



Выше уже упоминалась возможная связь эволюции жидких контуров и процессов переноса в жидких средах. Поясним этот тезис. Уравнение переноса субстанции с концентрацией  $c$  (где  $c$  может быть не только концентрацией химического вещества, но и температурой, энтальпией, компонентой вектора скорости и так далее) в безразмерном виде запишется как

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + (\vec{V} \nabla) c = \frac{1}{R} \Delta c + f, \quad (2)$$

где  $\tau$  - как и ранее, время;  $\vec{V}$  - вектор скорости потока;  $f$  - источниковый член, который может иметь различную физическую природу;  $R$  - безразмерная величина, характеризующая отношение конвективного и диффузионного переноса, в качестве величины  $R$  могут выступать число Рейнольдса  $Re = \frac{UL}{\nu}$ , число Пекле  $Pe = \frac{UL}{a}$ , рассчитанные по характерным скорости и геометрическому масштабу потока (все обозначения понимаются в традиционном смысле); операторы Гамильтона  $\nabla$  и Лапласа  $\Delta$  также понимаются в традиционном смысле.

Ограничимся рассмотрением случая  $R \gg 1$ , то есть,  $Re \gg 1$  (высокоскоростное турбулентное течение, которое на протяжении долгого времени успешно моделировалось и продолжает моделироваться течением идеальной жидкости в рамках модели уравнений Эйлера),  $Pe \gg 1$  (перенос пассивной субстанции с малым влиянием диффузионных процессов). Тогда  $\varepsilon = \frac{1}{R} \ll 1$ , отыскивая решение уравнения переноса (2) в виде ряда по малому параметру

$$c = c_0 + \varepsilon c_1 + \varepsilon^2 c_2 + \dots \quad (3)$$

и ограничившись нулевым приближением

$$\frac{\partial c_0}{\partial \tau} + (\vec{V} \nabla) c_0 = f_0, \quad (4)$$

получим уравнение переноса субстанции, «вмороженной» в жидкие частицы, соответствующие лагранжевому описанию (1). Выбирая жидкие частицы на перемещающемся жидком контуре, можно сделать вывод, что модель эволюции жидкого контура является полезным нулевым приближением для проблемы переноса примесей в потоке. Следует отметить, что указанное нулевое приближение дает достоверные результаты для ограниченных промежутков времени, если же временной интервал оказывается достаточно большим, то вязкостные и диффузионные эффекты могут аккумулироваться и существенно повлиять на решение. Тем не менее, существует достаточно большое число задач, для которых последнее ограничение не является принципиальным в сравнении с достоинствами предлагаемого подхода. А основным достоинством такого является намного большая вычислительная эффективность по сравнению с традиционными численными методами и даже иными лагранжевыми алгоритмами гидромеханики.

Таким образом, актуальность выбранной тематики исследований строго обоснована, и, более того, развитие данного направления представляется важным как для теоретической гидромеханики, так и для многочисленных прикладных областей, например, вычислительной экологии.

#### **Анализ последних достижений и публикаций по тематике исследования**

Лагранжевы методы вычислительной гидромеханики берут начало в эпоху, когда гидромеханика еще не была вычислительной, и основываются на идеях Эйлера, Лагранжа, Гельмгольца, Кельвина, Пуанкаре. К сожалению, ограниченный объем настоящей работы не позволяет привести здесь даже краткий анализ истории лагранжевых методов, которая одновременно и запутанна, и поучительна. Оставив вопрос об истории для последующих специальных исследований, здесь же отметим только, что лагранжевы методы играют недопустимо малую роль в современной вычислительной механике, несмотря на то, что для ряда задач гидромеханики они обладают рядом очевидных преимуществ перед другими численными подходами. Лагранжевы методы относятся к так называемым альтернативным методам, на долю которых по разным оценкам приходится от 5 до 10 % общего числа механических расчетов (значительная доля от этого количества является результатом применения метода граничных элементов в механике деформируемого твердого тела, где он особенно эффективен, но, строго говоря, метод граничных элементов не является лагранжевым). Анализ такого состояния лагранжевых методов, методов вычислительной теории потенциала и альтернативных методов в целом посвящены специальные работы [1–3], поэтому также не будем останавливаться на этом вопросе подробно.

Непосредственно настоящей работе предшествовали две серии публикаций, первая из которых была посвящена хаотичной адвекции, а вторая – контурной динамике. Задача об адвекции описывает перемешивание жидкостей в пренебрежении диффузионными эффектами, то есть, соответствует уравнению (4), а с физической точки зрения описывает начальные этапы этого процесса. Считается, что у истоков изучения адвективных течений стояли Дж.М. Оттино [4–7] и Х. Ареф [8–11]. Активность и



успехи этих исследователей вдохновили многочисленных последователей, среди которых хотелось бы отметить В.В. Мелешко и А.А. Гуржия [12–17]. Особый интерес для авторов настоящей статьи представляет применение методов хаотической адвекции в вычислительной экологии [18–20]. Все перечисленные выше работы по хаотической адвекции были связаны с процессами в потоках с явно выраженными хаотическими эффектами, то есть были ориентированы на турбулентное перемешивание. С другой стороны, во всех перечисленных работах расчеты проводились для достаточно больших промежутков времени. Наконец, как кинематическую причину перемешивания во всех указанных работах рассматривали различные вихревые структуры, а не движения твердых тел, как в настоящей работе.

Другим направлением, стимулировавшим появление настоящего исследования, является метод контурной динамики. Этот подход был предложен Ф. Сеффменом [21] как средство численного анализа течений идеальной жидкости с, вообще говоря, непрерывно распределенной завихренностью. Не трудно показать, что метод контурной динамики является, своего рода, обобщением метода дискретных вихрей, в ряде случаев намного более эффективным, нежели последний. Метод контурной динамики получил развитие в ряде интересных работ [22–24], однако, в целом, эффективность метода контурной динамики оказалась все-таки недостаточной для задач с распределенной завихренностью, для которых он был изначально позиционирован. Поскольку к моменту появления метода контурной динамики метод дискретных вихрей уже был достаточно хорошо развит, а речь шла о весьма узкой области применения, то успехи метода контурной динамики оказались более чем скромными. Тем не менее, идея контурной динамики была столь богатой и плодотворной, что оказала влияние на многие лагранжевы подходы вычислительной гидромеханики, в том числе и подход, развитый в настоящей работе.

Очень близка к методам хаотической адвекции модель «цветных жидкостей», которую В.Ф. Пивень и его ученики использовали в теории фильтрации и проблеме загрязнения грунтовых вод [25, 26] совместно с методом дискретных особенностей.

Остановимся на проблемах, не решенных в рассмотренных выше работах. В первую очередь, во всех упомянутых выше работах очень узок спектр гидродинамических причин, вызывающих движение жидкости, например, в качестве таких эффектов не рассматриваются предопределенные движения твердых тел, находящихся в области течения; в рассмотрение включаются лишь области распределенной завихренности, либо локализованная завихренность, но никогда эти эффекты не рассматриваются одновременно, в рассмотрение не включаются свободные поверхности и другие многообразия, связанные с разрывами свойств жидкой среды. Понятно, что в ограниченных рамках настоящей работы говорить об охвате всего этого спектра гидродинамических эффектов не приходится, однако стремление к обобщению формулировок соответствующих задач представляется шагом именно в таком направлении. Другим, по мнению авторов настоящей работы весьма существенным, упущением предшествующих исследователей является недостаточное внимание к точности вычислительных процессов, ими применявшихся. На первый взгляд, учитывая, что в процессе исследования используются достаточно грубые математические модели вида (4), может показаться, что вопрос о точности численного решения не столь уж и важен. Однако, основной глобальный вычислительный процесс в данном случае – это расчет эволюции контура и гидродинамической системы, в которой он движется. Грубая математическая модель генерирует существенную погрешность, которая, как правило, имеет систематический характер, к ней добавляется совершенно независимая от нее погрешность численного определения поля скоростей течения, и только затем обе эти погрешности входят в расчетную схему эволюции жидкого контура. То есть, на каждом шаге по времени в процессе численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию жидкого контура, помимо неизбежных при численном решении ошибок аппроксимации в процедуру численного решения вносятся систематические и несистематические погрешности описанного выше происхождения. Поскольку три вышеупомянутых разновидности вычислительной погрешности имеют совершенно различную природу, их величины могут различаться вплоть до нескольких порядков в зависимости от особенностей конкретной задачи. Получить теоретические оценки погрешности общей расчетной схемы, описанной выше, как правило, затруднительно, а часто совершенно невозможно, поэтому представляется целесообразным исследовать общую погрешность путем численного эксперимента, для чего следует разработать соответствующую методику.

#### **Цель исследования**

Основываясь на вышеизложенном, можно сформулировать цель работы как развитие методики структурно-топологического анализа сложных течений жидкости на основе лагранжева моделирования эволюции жидких контуров, и анализ погрешности такого вычислительного подхода путем численного эксперимента.

#### **Изложение основного материала исследования**

Поскольку любую методику легче развивать на простейших задачах, дальнейшее рассмотрение проведем на примере плоского течения идеальной несжимаемой жидкости, в общем случае

описываемого уравнениями Эйлера [27]. Как известно [27], для таких течений идеальной жидкости существует два альтернативных и более удобных, чем уравнения Эйлера, способа описания. Первый из них основан на использовании потенциала скоростей для потенциального течения:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = V_n, \quad (6)$$

где  $\varphi$  - потенциал скоростей,  $n$  - внешняя нормаль к границе области решения  $\Gamma$ ,  $V_n$  - известная функция, имеющая на границе области решения физический смысл нормальной скорости. Потенциал скорости связан с полем скорости  $\vec{V}$  очевидными соотношениями:

$$\vec{V} = \text{grad} \varphi, \quad V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}. \quad (7)$$

Условие потенциальности

$$\text{rot} \vec{V} = 0 \quad (8)$$

гарантирует существование потенциала скоростей. Здесь и далее рассматриваемые поля и операции будут описаны в декартовой ортогональной системе координат, а дифференциальные операторы  $\text{rot}$ ,  $\text{grad}$ ,  $\text{div}$ ,  $\nabla$ ,  $\Delta$  будут пониматься в традиционном смысле. Формулировка (5)–(8) является традиционной и подробно описана в монографии [27] и других классических книгах по гидромеханике.

Альтернативой формулировке (5)–(8) является использование в постановке задачи функции тока  $\psi$ , которая удовлетворяет уравнению [27]

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (9)$$

где  $\omega$  - завихренность, связанная с вектором скорости в общем случае соотношением

$$\vec{\omega} = \text{rot} \vec{V}, \quad (10)$$

вектор скорости  $\vec{V}$  связан с функцией тока традиционным представлением:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (11)$$

Граничное условие на границе  $\Gamma$  следует поставить в виде

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial s} \right|_{\Gamma} = V_n, \quad (12)$$

где  $s$  - касательная к контуру  $\Gamma$ , а  $V_n$  имеет тот же смысл, что и в условии (6).

Поскольку условие (12) имеет неканоническую форму, проинтегрируем его по  $s$  вдоль отдельных составных частей границы  $\Gamma_i$

$$\psi = \psi_{0i} + \int_{s_0}^s V_n(s) ds, \quad (13)$$

где  $\psi_{0i}$  - некоторая постоянная величина. Условие (13) по форме является условием Дирихле.

Постановка (9)–(13) должна быть дополнена уравнением переноса завихренности [27]

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + (\vec{V} \nabla) \omega = 0, \quad (14)$$

где  $\tau$  - время. Уравнение (14) нуждается в граничных и начальных условиях, но для настоящего исследования они интереса не представляют и при необходимости могут быть найдены во все той же монографии [27].

Очевидно, что постановка (9)–(14) является более общей, нежели (5)–(8), и совпадают они только в случае потенциального течения (8). Однако аналогия между уравнением Лапласа (5) и уравнением Пуассона (9) очевидна. Более того, с точки зрения математической физики уравнение (5) является частным случаем уравнения (9). Поэтому все дальнейшие рассуждения будут проводиться для уравнения (9), относясь к (5) как к частному случаю.

Перейдем к интегральному аналогу уравнения (9) (задачу сформулируем для функции тока как более общего случая)

$$c(x_0, y_0)\psi(x_0, y_0) = \int_{\Gamma} g(x, x_0, y, y_0) \frac{\partial \psi}{\partial n}(x, y) ds(x, y) - \\ - \int_{\Gamma} \psi(x, y) \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial n(x, y)} ds(x, y) + \int_D \omega(x, y) g(x, x_0, y, y_0) dx dy, \quad (15)$$

где  $D$  - область течения, точка  $(x_0, y_0)$  называется точкой наблюдения (точкой коллокации), точка  $(x, y)$  - точкой источника, функция  $c$  является функцией расположения точки  $(x_0, y_0)$  относительно границы  $\Gamma$  и определяется как

$$c(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & (x_0, y_0) \in D; \\ 1/2, & (x_0, y_0) \in \Gamma; \\ 0, & (x_0, y_0) \notin D, (x_0, y_0) \notin \Gamma, \end{cases} \quad (16)$$

функция  $g(x, x_0, y, y_0)$  - фундаментальное решение уравнения Лапласа

$$g(x, x_0, y, y_0) = -\frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (17)$$

или соответствующая функция Грина.

Численное решение граничного интегрального уравнения (15) проводилось традиционным методом граничных элементов [28, 29] или регулярным методом граничных элементов [30, 31], поэтому не будем останавливаться на нем подробно. Отметим только, что точность численного решения задач Дирихле и Неймана для уравнения Лапласа методом граничных элементов выше, чем при использовании методов конечных разностей и конечных элементов, особенно для областей сложной формы.

Для численного решения задач Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1), в принципе, может быть применен любой из методов решения соответствующих задач, например, метод Эйлера или метод Рунге-Кутты. Традиционно в таких задачах используется схема Эйлера, то есть, для задачи Коши:

$$\frac{dx_{\gamma}}{d\tau} = V_x(\tau, x_{\gamma}, y_{\gamma}), \quad (18)$$

$$\frac{dy_{\gamma}}{d\tau} = V_y(\tau, x_{\gamma}, y_{\gamma}),$$

$$\begin{aligned} x_{\gamma}(\tau = 0) &= x_{\gamma 0}, \\ y_{\gamma}(\tau = 0) &= y_{\gamma 0}, \end{aligned} \quad (19)$$

предлагается следующая расчетная схема:

$$\begin{aligned} x_{\gamma}(\tau + \delta\tau) &= x_{\gamma}(\tau) + \delta\tau V_x(\tau, x_{\gamma}(\tau), y_{\gamma}(\tau)), \\ y_{\gamma}(\tau + \delta\tau) &= y_{\gamma}(\tau) + \delta\tau V_y(\tau, x_{\gamma}(\tau), y_{\gamma}(\tau)) \end{aligned} \quad (20)$$

Реализация расчетной схемы (20) предполагает знание скоростей  $V_x, V_y$  в произвольной точке потока. Необходимые значения могут быть получены из представления (15) (для случая  $(x_0, y_0) \in D$ ) путем параметрического дифференцирования по координатам  $x_0, y_0$ , соответственно:

$$\begin{aligned} V_x(x_0, y_0) &= \frac{\partial \psi}{\partial y_0}(x_0, y_0) = \int_{\Gamma} \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial y_0} \frac{\partial \psi}{\partial n}(x, y) ds(x, y) - \\ &- \int_{\Gamma} \psi(x, y) \frac{\partial^2 g(x, x_0, y, y_0)}{\partial n(x, y) \partial y_0} ds(x, y) + \int_D \omega(x, y) \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial y_0} dx dy, \\ V_y(x_0, y_0) &= -\frac{\partial \psi}{\partial x_0}(x_0, y_0) = -\int_{\Gamma} \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial x_0} \frac{\partial \psi}{\partial n}(x, y) ds(x, y) + \\ &+ \int_{\Gamma} \psi(x, y) \frac{\partial^2 g(x, x_0, y, y_0)}{\partial n(x, y) \partial x_0} ds(x, y) - \int_D \omega(x, y) \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial x_0} dx dy, \end{aligned} \quad (21)$$

где все интегралы являются регулярными. В практических расчетах, конечно, используется не само представление (21), а его дискретный аналог с учетом граничноэлементной аппроксимации и решения,

построенного тем же методом. При этом точность численного определения скоростей по дискретному аналогу (21) оказывается близкой к точности решения краевой задачи методом граничных элементов, то есть, является достаточно высокой.

Применение подобного метода оказывается достаточно эффективным, хотя на каждом шаге по времени он должен быть дополнен определением поля завихренности. В практических расчетах, реализованных в настоящей работе, рассматривались только случаи локализованной завихренности (дискретные вихри), для которых уравнение переноса завихренности (14) вырождается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. В случае же потенциального течения эффективность предложенного подхода оказывается много выше, чем для случая вихревого течения.

Описанный выше подход может быть распространен на пространственные течения, соответствующие общему виду системы (1). К сожалению, в пространственном случае не используется столь мощный и удобный аппарат, как функция тока, поэтому приходится довольствоваться случаем потенциального течения.

В заключение описания расчетной схемы хотелось бы указать на еще одно ее безусловное достоинство в сравнении, например, с методами конечных разностей и конечных элементов, – прямое вычисление скорости в любой точке потока, в то время как последние названные методы требуют для этого дополнительной процедуры интерполяции, вносящей в решение дополнительную погрешность.

Оценка погрешности предложенной расчетной схемы представляет собой весьма нетривиальную проблему. Хотя структура и свойства погрешности схемы Эйлера подробно изучены и на сегодняшний день общеизвестны, те же самые свойства при внесении дополнительной систематической или стохастической погрешности на каждом шаге по времени в ходе расчета оказываются практически неподдающимися теоретическому определению. Частично преодолеть возникающие затруднения позволяют специально разработанные методики исследования погрешности алгоритма при помощи вычислительного эксперимента. Ниже приведем несколько эвристических приемов, позволяющих получить хотя бы качественное представление о погрешности полного вычислительного процесса:

1. Наиболее простым и естественным представляется найти задачу об эволюции жидкого контура, имеющую известное аналитическое решение, желательно построенное в квадратурах. Действительно, для задач внешнего обтекания плоскими потенциальными потоками идеальной несжимаемой жидкости методами теории функций комплексного переменного было построено множество аналитических решений. В этом случае, построение аналитического решения задачи об эволюции жидкого контура сведется к аналитическому интегрированию задачи Коши (18), (19), что, в принципе, возможно. Однако столь упрощенная задача не представляет практического интереса, а, в то же время, полученное аналитическое решение оказывается чересчур сложным.

2. С другой стороны, использование аналитических решений для поля скорости совместно с численным расчетом движения жидкой частицы создает дополнительные возможности исследования расчетной схемы путем внесения заранее предопределенных возмущений поля скорости. Такой подход способен обеспечить лучшее качественное понимание особенностей расчета при применении совместно с описанными далее непрямыми методами контроля погрешности.

3. Для стационарных течений, в которых траектории движения жидких частиц совпадают с линиями тока, может быть предложен следующий прямой прием для анализа точности: по отклонению функции тока в точке текущего расположения жидкой частицы от его начального значения можно определить смещение частицы в направлении, нормальном к линии тока, возникающее вследствие погрешности расчета. Такой подход позволяет организовать коррекцию положения жидкой частицы в процессе расчета, но, к сожалению, не дает возможности определить погрешность процесса интегрирования вдоль линии тока. Также этот метод неприменим в пространственных задачах и для нестационарных вихревых течений.

4. Как отмечалось выше, для замкнутого жидкого контура  $\gamma_i$  площадь охватываемой им области  $D_i$  в процессе течения сохраняется ( $S_i = \text{const}$ ). На этом основан еще один принцип непрямого контроля погрешности: в момент времени  $\tau$  площадь, ограниченная контуром  $\gamma_i$  равна

$$S_i(\tau) = \int_{D_i} dx dy = \int_{D_i} \text{div} \vec{A} dx dy = \int_{\gamma_i} \vec{A} \vec{n} ds, \quad (22)$$

где  $\text{div} \vec{A} = 1$  и в качестве вектора  $\vec{A}$  удобно выбрать  $\vec{A} = \left\{ \frac{x}{2}, \frac{y}{2} \right\}$ . Тогда, сравнивая  $S_i(\tau)$  с  $S_i(\tau = 0)$ , можно оценить накопление погрешности расчета.

5. При обращении поля скоростей  $\vec{V} \rightarrow -\vec{V}$  через такой же промежуток времени, какой прошел с начала движения, жидкий контур должен вернуться в исходное положение, разница между исходным и

рассчитанным положением жидкого контура характеризует накопление случайной (несистематической) погрешности.

#### Анализ полученных результатов

Ограниченный объем настоящей работы не позволяет привести полностью материалы проведенных расчетов и предложить их анализ. Поэтому при анализе результатов ограничимся одним, наиболее очевидным случаем эволюции изначально круглого жидкого контура при поперечном обтекании кругового цилиндра. Данная задача достаточно проста и очевидна: картина линий тока и структура поля скоростей в этом случае хорошо известны даже начинающим специалистам по гидромеханике. Схема движения жидкого контура показана на рис. 1. Горизонтальная черта, проведенная внутри области течения, соответствует оси абсцисс и нулевой линии тока. Окружность, пересекающая ось абсцисс, изображает обтекаемый контур, а последовательность фигур над ним соответствует формам эволюционирующего жидкого контура. Отметим, что наибольшее изменение формы жидкого контура имеет место при максимальных градиентах скорости, чего и следовало ожидать, но при уменьшении градиента скорости форма контура восстанавливается не полностью.

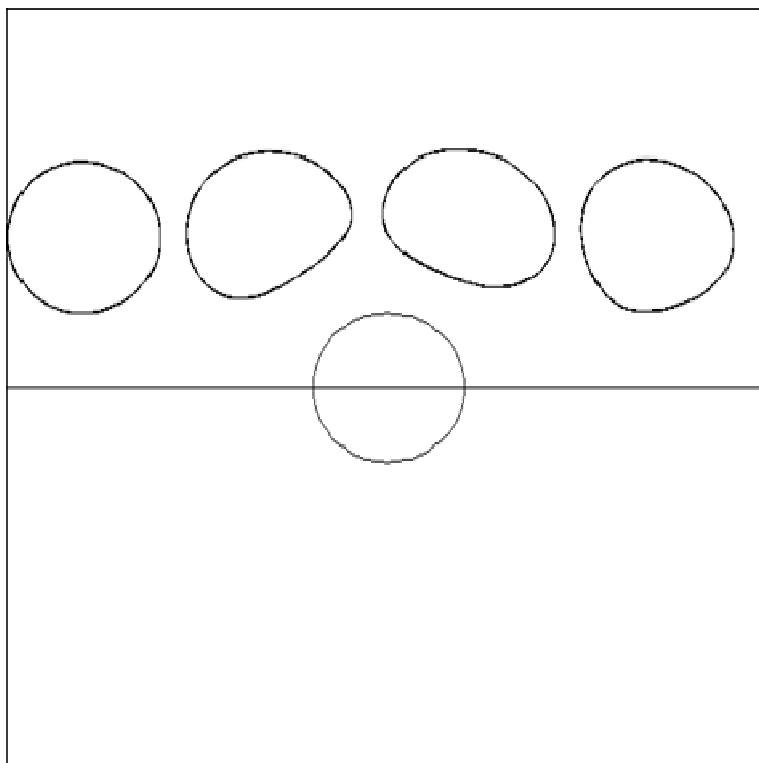


Рис. 1. Схема движения жидкого контура

Численные характеристики непрямого анализа погрешности расчета движения жидкого контура, показанного на рис. 1, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение площади, охватываемой контуром в процессе движения

| Номер шага по времени<br>(безразмерный шаг по времени 0,01) | Аналитическое значение площади, охватываемой контуром | Начальное приближенное значение площади | Рассчитанное значение площади |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| 1                                                           | 3.141593                                              | 3.141075                                | 3.141075                      |
| 200                                                         |                                                       |                                         | 3.141090                      |
| 400                                                         |                                                       |                                         | 3.141083                      |
| 600                                                         |                                                       |                                         | 3.141081                      |
| 800                                                         |                                                       |                                         | 3.141078                      |
| 1000                                                        |                                                       |                                         | 3.141081                      |
| 1200                                                        |                                                       |                                         | 3.141077                      |

Смещение точек контура при обращении поля скоростей (смотрите выше) составило не более 1,2%, также не более 1,0 % составило отклонение жидких частиц от линии тока, по которой им надлежит двигаться. Приведенные результаты наглядно показывают достаточно высокую точность предложенного подхода, правда, определенную непрямыми методами численного эксперимента.

#### **Выводы и анализ перспектив дальнейших исследований**

Описанный выше подход к качественному анализу структурно-топологических особенностей течений жидкостей, в которых доминирует конвективный перенос, представляется, может быть, и не достаточно универсальным, зато весьма эффективным в рамках своей применимости. Жидкий контур в процессе движения отображает большинство свойств течения, в том числе, расхождение траекторий изначально близких жидких частиц, удлинение или уменьшение внутренних границ течения. Более того, в задачах внешнего обтекания жидкий контур не всегда сохраняет связность, и в последнем случае, топологическая картина поля течения изменяется качественно. Принципиально важным с прикладной точки зрения является анализ течений, вызванных движением твердых тел, особый интерес вызывает колебательное движение тел в ограниченных или в полуограниченных областях; как известно, при колебательных движениях, особенно с высокой частотой, модель идеальной несжимаемой жидкости может применяться в более широких диапазонах чисел Рейнольдса. В целом, предложенный подход существенно расширяет возможности качественного анализа полей течения.

В работе, насколько известно авторам, впервые предпринята попытка проанализировать погрешность расчета эволюции жидкого контура при помощи численного эксперимента. Численный эксперимент ни в коей мере не может считаться доказательной оценкой погрешности расчета в силу очень многих обстоятельств, среди которых зависимость результата от качества применяемого программного обеспечения, обязательная неполнота набора тестовых задач, зависимость результата от формы области решения и особенностей рассматриваемой задачи. Тем не менее, результаты подобных численных экспериментов оказываются удобным инструментом эвристического анализа свойств применяемого алгоритма. Кроме того, численный эксперимент по изучению точности определенной расчетной схемы почти всегда проводится на том же наборе тестовых задач, что и тестирование разработанного программного обеспечения, что достаточно удобно и сокращает время на подготовку такого эксперимента. Тем не менее, для выработки рекомендаций по алгоритмическим решениям в рамках соответствующего подхода необходимо накопить более значительный объем результатов численных экспериментов, что будет сделано в дальнейших исследованиях.

Два класса прикладных задач могут быть успешно исследованы при помощи предложенного выше подхода. Первый из них – это задачи вычислительной экологии, в частности, проблемы переноса пассивной примеси, в качестве которой рассматривается загрязнение. Зачастую, подобные задачи приходится формулировать в областях достаточно сложной геометрической формы, моделирующих городскую застройку или производственные помещения с вредными условиями труда. Именно для таких областей оказывается особенно эффективным метод граничных элементов или комбинированный метод граничных элементов и дискретных вихрей (в данной работе не рассматривался). Предложенный подход позволяет не только эффективно решать рассматриваемый класс задач, но и анализировать точность полученных результатов по описанной выше методике, что позволяет рекомендовать его в качестве численного алгоритма для релевантных расчетов.

Вторым прикладным направлением, которое тесно связано с развитым выше вычислительным подходом, являются движения жидкости в баках транспортных средств, в том числе топливных баках, подверженных периодическим и непериодическим внешним механическим воздействиям разной амплитуды и интенсивности. При кратковременных внешних воздействиях вполне применима модель идеальной несжимаемой жидкости, рассмотренная выше. Очевидно, что подход, развитый в данной работе, окажется весьма эффективным и в этом случае и обеспечит все те же преимущества при оценке точности проведенных расчетов. Особый личный интерес авторов настоящей работы вызывают движения криогенной жидкости в топливных баках ракет-носителей на жидком топливе на активном участке траектории. В последней задаче рассмотрению подлежит эволюция жидкого контура, охватывающего достаточно тонкую область вблизи стенок бака, содержащую паровые пузырьки. В зависимости от особенностей эволюции такого жидкого контура указанные паровые пузырьки могут в больших количествах попасть в магистрали питания ракетного двигателя и вызвать там интенсивную кавитацию. Приведенный выше анализ однозначно позволяет рекомендовать предложенный подход в качестве расчетного средства для анализа движений жидкости в баках транспортных средств.

Перспективы дальнейших исследований в рассмотренном направлении достаточно очевидны. Во-первых, это распространение предложенного в настоящей работе подхода на пространственный случай потенциальных течений, на случай вихревых течений идеальной жидкости, течения вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса и, по возможности, на общий случай течения вязкой жидкости как с целью теоретического анализа структурно-топологических особенностей течения, так и с целью эффективного численного решения прикладных задач, указанных выше. Во-вторых, к перспективам



дальнейших исследований относятся возможные усовершенствования расчетного алгоритма в виде использования более эффективных и точных схем интегрирования по времени, а также новых схем метода граничных элементов. Наконец, весьма немаловажным направлением развития предложенного подхода представляется поиск новых прикладных задач, для которых таковой оказался бы удобным в применении и эффективным. Такие задачи, вероятно, можно найти в гидрометеорологии, океанологии, химической и металлургической промышленности.

#### Список использованной литературы

1. Евдокимов Д.В., Кочубей А.А., Поляков Н.В. Анализ тенденций развития современного математического и численного моделирования. *Вісник Дніпропетровського університету, серія «Моделювання»*. 2009. Випуск 1, № 8. С. 5–17.
2. Поляков Н.В., Евдокимов Д.В. Вычислительная теория потенциала. Современное состояние и перспективы использования в механике сплошной среды. Часть 1. Линейные задачи. *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Механіка*. 2006. № 2/1. С. 7–25.
3. Поляков Н.В., Евдокимов Д.В. Вычислительная теория потенциала. Современное состояние и перспективы использования в механике сплошной среды. Часть 2. Нелинейные задачи. *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Механіка*. 2006. № 2/1. С. 25–42.
4. Ottino J.M. The Kinematics of Mixing, Stretching, Chaos and Transport: monograph. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 364 p.
5. Ottino J.M. The mixing of fluids. *Scientific American*. January, 1989. P. 55–67.
6. Ottino J.M. Mixing, chaotic advection and turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1990. Vol. 22. P. 207–253.
7. Ottino J.M., Souvalitos A., Metcalfe G. Chaotic mixing processes: New problems and computational issues. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 6. P. 425–438.
8. Aref H. Stirring by chaotic advection. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. Vol. 143. P. 1–23.
9. Aref H. Chaotic advection of fluid particle. *Philosophical Transaction of Royal Society of London*. 1996. Vol. A333. P. 273–288.
10. Aref H. Chaotic advection in perspective. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 4. P. 745–748.
11. Aref H. The development of chaotic advection. *Physics of Fluids*. 2002. Vol. 14. P. 1315–1325.
12. Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур: монография. К.: Наукова думка, 1993. 280 с.
13. Meleshko V.V., Konstantinov M.Yu., Gurzhi A.A., Konovaluk T.P. Advection of a Vortex pair atmosphere in a Velocity field of point vortices. *Physics of Fluids*. 1992. Vol. 4. P. 2779–2797.
14. Meleshko V.V., Van Heist B.J.F. Interacting two-dimensional vortex structures: point vortices, contour kinematics and stirring properties. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 4. P. 977–1010.
15. Гуржий О.А., Мелешко В.В., Ван Хейст Г.Я.Ф. Метод сплайн-інтерполяції в задачі про адвекцію пасивної домішки у відомому полі швидкості. *Доповіді НАН України*. 1991. № 8. С. 54–62.
16. Гуржий А.А., Псєрхосаїни Х. Локальная карта растяжений: приложение для задач адвекции в произвольном поле скорости. *Прикладная гидромеханика*. 2000. Т. 2, № 1. С. 28–43.
17. Гуржий А.А., Прокопович И.С. Адвекция пассивной жидкости в поле скорости двух точечных вихрей круглой области. *Вісник Харківського національного університету*. 2009. № 847. С. 123–130.
18. Гуржий А.А., Черний Д.И. Адаптированный метод дискретных особенностей к задаче адвекции пассивной примеси морскими течениями. *Прикладная гидромеханика*. 2009. Т. 11, № 2. С. 30–39.
19. Гуржий А.А., Черний Д.И. Решение задачи о двумерной адвекции пассивной примеси морскими течениями прогностическим методом. *Вісник Харківського національного університету*. 2010. № 863. С. 83–91.
20. Кошель К.В., Пранц С.В. Хаотическая адвекция в океане: монография. М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008. 360 с.
21. Saffman P.Q. Vortex Dynamics: monograph. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 311 p.
22. Dritschel D.G. Contour dynamics and contour surgery: numerical algorithms for extended, high-resolution of vortex dynamics in two-dimensional, inviscid, incompressible flows. *Computer Physics Reports*. 1999. Vol. 10. P. 77–146.
23. Zabusky N.J., Huges M.H., Roberts K.V. Contour dynamics for the Euler equations in two dimension. *Journal of Computational Physics*. 1997. Vol. 135. P. 220–226.
24. Pullin D.I. Contour dynamics method. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1991. Vol. 24. P. 84–115.
25. Пивень В.Ф. Интегральные и интегродифференциальные уравнения двумерной задачи сопряжения поля скоростей на нестационарной границе. *Дифференциальные уравнения*. 2002. Т. 38, № 12. С. 1705–1710.

26. Пивень В.Ф. Теория и приложения математических моделей фильтрационных течений жидкости: монография. Орел: Изд-во ГОУ ВПО «Орловский госуниверситет», 2006. 508 с.
27. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика: монография. М.: Физматгиз, 1965. Т. 1, 758 с. Т. 2, 772 с.
28. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов: монография. М.: Мир, 1987. 524 с.
29. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках: монография. М.: Мир, 1984. 494 с.
30. Евдокимов Д.В. Об одном варианте регулярного метода граничных элементов. *Вісник Дніпропетровського університету. Механіка*. 1999. Випуск 2, том 1. С. 150–156.
31. Евдокимов Д.В. Разработка прямых регулярных алгоритмов вычислительной теории потенциала с точками коллокации внутри области решения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/7 (74). С. 16–25.

#### References

1. Yevdokymov D.V., Kochubei O.O., Poliakov M.V. Analiz tendentsiy razvitiya sovremennogo matematicheskogo i chislennogo modelirovaniya. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu, seriia «Modeliuvannia»*. 2009. Vypusk 1, № 8. S. 5–17.
2. Poliakov M.V., Yevdokymov D.V. Vyichislitel'naya teoriya potentsiala. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya v mehanike sploshnoy sredy. Chast 1. Lineynyye zadachi. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Ser. Mekhanika*. 2006. № 2/1. S. 7–25.
3. Poliakov M.V., Yevdokymov D.V. Vyichislitel'naya teoriya potentsiala. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya v mehanike sploshnoy sredy. Chast 2. Nelineynyye zadachi. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Ser. Mekhanika*. 2006. № 2/1. S. 25–42.
4. Ottino J.M. The Kinematics of Mixing, Stretching, Chaos and Transport: monograph. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 364 p.
5. Ottino J.M. The mixing of fluids. *Scientific American*. January, 1989. P. 55–67.
6. Ottino J.M. Mixing, chaotic advection and turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1990. Vol. 22. P. 207–253.
7. Ottino J.M., Souvalitos A., Metcalfe G. Chaotic mixing processes: New problems and computational issues. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 6. P. 425–438.
8. Aref H. Stirring by chaotic advection. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. Vol. 143. P. 1–23.
9. Aref H. Chaotic advection of fluid paticle. *Philosophical Transaction of Royal Society of London*. 1996. Vol. A333. P. 273–288.
10. Aref H. Chaotic advection in perspective. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 4. P. 745–748.
11. Aref H. The development of chaotic advection. *Physics of Fluids*. 2002. Vol. 14. P. 1315–1325.
12. Meleshko V.V., Konstantinov M.Yu. Dinamika vihrevyih struktur: monografiya. K.: Naukova dumka, 1993. 280 s.
13. Meleshko V.V., Konstantinov M.Yu., Gurzhi A.A., Konovaluk T.P. Advection of a Vortex pair atmosphere in a Velocity field of point vortices. *Physics of Fluid*. 1992. Vol. 4. P. 2779–2797.
14. Meleshko V.V., Van Heist B.J.F. Interacting two-dimensional vortex structures: point vortices, contour kinematics and stirring properties. *Chaos, Solitons and Fractals*. 1994. Vol. 4. P. 977–1010.
15. Gurzhi A.A., Meleshko V.V., Van Heist B.J.F. Metod splain-interpoliatsii v zadachi pro adveksiui pasyvnoi domishky u vidomomu poli shvydkosti. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 1991. № 8. S. 54–62.
16. Gurzhi A.A., Pserhosaini H. Lokal'naya karta rastyazheniy: prilozenie dlya zadach adveksii v proizvolnom pole skorosti. *Prikladnaya gidromekhanika*. 2000. T. 2, № 1. S. 28–43.
17. Gurzhi A.A., Prokopovich I.S. Adveksiya passivnoy zhidkosti v pole skorosti dvuh tochechnyih vihrey krugloy oblasti. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu*. 2009. № 847. S. 123–130.
18. Gurzhi A.A., Cherniy D.I. Adaptirovannyiy metod diskretnyih osobennostey k zadache adveksii passivnoy primesi morskimi techeniyami. *Prikladnaya gidromekhanika*. 2009. T. 11, № 2. S. 30–39.
19. Gurzhi A.A., Cherniy D.I. Reshenie zadachi o dvumernoy adveksii passivnoy primesi morskimi techeniyami prognosticheskim metodom. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu*. 2010. № 863. S. 83–91.
20. Koshel K.V., Prants S.V. Haoticheskaya adveksiya v okeane: monografiya. M., Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», Institut kompyuternyih issledovaniy, 2008. 360 s.
21. Saffman P.Q. Vortex Dynamics: monograph. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 311 p.
22. Dritschel D.G. Contour dynamics and contour surgery: numerical algorithms for extended, high-resolution of vortex dynamics in two-dimensional, inviscid, incompressible flows. *Computer Physics Reports*. 1999. Vol. 10. P. 77–146.
23. Zabusky N.J., Huges M.H., Roberts K.V. Contour dynamics for the Euler equations in two dimension. *Journal of Computational Physics*. 1997. Vol. 135. P. 220–226.

24. Pullin D.I. Contour dynamics method. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1991. Vol. 24. P. 84–115.
25. Piven V.F. Integralnyie i integrodifferentsialnyie uravneniya dvumernoy zadachi sopryazheniya polya skorostey na nestatsionarnoy granitse. *Differentsialnyie uravneniya*. 2002. T. 38, № 12. S. 1705–1710.
26. Piven V.F. Teoriya i prilozheniya matematicheskikh modeley filtratsionnykh techeniy zhidkosti: monografiya. Orel: Izd-vo GOU VPO «Orlovskiy gosuniversitet», 2006. 508 s.
27. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika: monografiya. M.: Fizmatgiz, 1965. T. 1, 758 s. T. 2, 772 s.
28. Brebbiya K., Telles Zh., Vroubel L. Metody granichnykh elementov: monografiya. M.: Mir, 1987. 524 s.
29. Benerdzhii P., Batterfield R. Metod granichnykh elementov v prikladnykh naukakh: monografiya. M.: Mir, 1984. 494 s.
30. Yevdokymov D.V. Ob odnom variante regul'yarnogo metoda granichnykh elementov. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Mekhanika*. 1999. Vypusk 2, tom 1. S. 150–156.
31. Yevdokymov D.V. Razrabotka pryamykh regul'yarnykh algoritmov vyichislitel'noy teorii potentsiala s tochkami kollokatsii vnutri oblasti resheniya. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2015. № 2/7 (74). S. 16–25.

УДК 519.857

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Ю.Э. ВЯЛА, А.В. ГЕЙЛИК, О.В. ЛЯШКО

Государственный университет инфраструктуры и технологий

И.В. СМЕРНОВ

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

### ЗАДАЧА О ЗАМЕНЕ ОБОРУДОВАНИЯ: НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ СЛУЧАИ

Методы динамического программирования широко используются при решении задач, возникающих во многих областях человеческой деятельности. Задача об обновлении оборудования является одной из них. Моральный и физический износ оборудования ведёт к необходимости его замены. Таким образом, возникает задача выработки стратегии поэтапной замены оборудования, обеспечивающей максимальную прибыль в течении планового периода.

В данной статье мы рассматриваем способы устранения проблемы, возникающей при невозможности построения функции Беллмана. Описаны три способа её разрешения. Первый способ: не вычислять значение функции Беллмана и оставлять соответствующие клетки таблицы значений пустыми. При применении второго способа считаем, что оборудование, возраст которого равен продолжительности планового периода необходимо заменить. Третий способ предполагает увеличение продолжительности планового периода на основе прогнозируемых значений прибылей и остаточной стоимости оборудования, возраст которого больше чем имеющегося в наличии.

Рассмотрен абстрактный пример построения функции Беллмана каждым из трех способов. Проанализированы недостатки всех способов. Уделено внимание также ситуации, возникающей в случае, когда в зоне замены находятся элементы, для которых более предпочтительно сохранение оборудования.

На этапе безусловной оптимизации проведен сравнительный анализ распределения прибылей по годам при применении стратегий обновления, основанных на построении функции Беллмана каждым из предложенных способов. Акцентировано внимание на зависимости уровня адекватности модели от точности прогнозируемых значений прибыли и остаточной стоимости оборудования при использовании третьего способа.

Предложена возможность применения ещё одного способа, основанного на идее увеличения длительности планового периода и дальнейшего анализа распределения инвестиций для различных стратегий обновления оборудования. Отмечено, что описанные методики наиболее эффективны для оборудования с быстрым моральным износом (средства мобильной связи, компьютерная техника).

Ключевые слова: динамическое программирование, замена оборудования, стратегия, функция Беллмана, безусловная оптимизация.

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Ю.Э. ВЯЛА, А.В. ГЕЙЛИК, О.В. ЛЯШКО

Державний університет інфраструктури та технологій

І.В. СМЕРНОВ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ЗАДАЧА ПРО ЗАМІНУ ОБЛАДНАННЯ: ДЕЯКІ СПЕЦІАЛЬНІ ВИПАДКИ

Методи динамічного програмування широко використовуються при розв'язанні задач, що виникають у багатьох областях людської діяльності. Задача про оновлення обладнання є однією з них. Моральне та фізичне старіння обладнання призводить до необхідності його заміни. Таким чином, виникає задача вироблення стратегії поетапної заміни обладнання, що забезпечує максимальний прибуток протягом планового періоду.

У даній статті ми розглядаємо способи усунення проблеми, що виникає при неможливості побудови функції Беллмана. Описано три способи її вирішення. Перший спосіб: не обчислювати значення функції Беллмана в цьому випадку і залишати відповідні клітини таблиці значень порожніми. При застосуванні другого способу вважаємо, що обладнання, вік якого дорівнює тривалості планового періоду повинно бути замінено. Третій спосіб базується на збільшенні тривалості планового періоду на основі прогнозу залишкової вартості і прибутків для обладнання, вік якого більший за вік того, що є в наявності.

Розглянуто абстрактний приклад побудови функції Беллмана кожним з трьох способів. Проаналізовано недоліки всіх способів. Приділено також увагу ситуації, яка виникає в разі, коли в зоні заміни знаходяться елементи, для яких більш доцільним є варіант збереження обладнання.

На етапі безумовної оптимізації проведено порівняльний аналіз розподілу прибутків по роках при застосуванні стратегій оновлення, що базуються на побудові функції Белмана кожним із запропонованих способів. Акцентовано увагу на залежності рівня адекватності моделі від точності прогнозованих значень прибутку і залишкової вартості обладнання при використанні третього способу.

Запропоновано можливість застосування ще одного способу, в основі якого лежить ідея збільшення тривалості планового періоду, і подальшого аналізу розподілу інвестицій для різних стратегій оновлення обладнання. Зазначено, що описані методики найбільш ефективні для обладнання з швидким моральним зношуванням (засоби мобільного зв'язку, комп'ютерна техніка тощо).

Ключові слова: динамічне програмування, заміна обладнання, стратегія, функція Белмана, безумовна оптимізація.

A.Yu. ANDREYTSYEV, Yu.E. VYALA, A.V. HEYLIK, O.V. LIASHKO

State University of Infrastructure and Technologies

I.V. SMYRNOV

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

### PROBLEM OF REPLACING EQUIPMENT: SOME SPECIAL CASES

Methods of dynamic programming are widely used in solving problems arising in many areas of human activity. The problem of equipment replacement is one of them. Moral and physical obsolescence of equipment leads to the need to replace it. Thus, the task of developing a strategy for the phased replacement of equipment arises when it is necessary to ensure maximum profit during the planned period.

In this paper, we consider ways to eliminate the problem that arises if the construction of the Bellman function is impossible. Three ways to solve it are described. The first way: not to calculate the value of the Bellman function and to leave the corresponding cells in the value table empty. When applying the second method, we consider that the equipment whose age is equal to the duration of the planned period should be replaced. The third method implies an increase in the duration of the planned period based on the forecasted profit and the residual value of the equipment, the age of which is greater than the available one.

We considered an abstract example of constructing the Bellman function in each of three ways. Analysis of the shortcomings of all the methods has been carried out. Attention is also paid to the situation that arises when there are elements in the replacement zone for which equipment keeping is preferable.

A comparative analysis of the distribution of profits by year in the application of updating strategies based on the construction of the Bellman function by each of the proposed methods was carried out at the stage of unconditional optimization. Attention is focused on the dependence of the level of the model adequacy on the accuracy of the forecasted of profit and the residual value of the equipment when using the third method.

The possibility of applying another method based on the idea of increasing the duration of the planned period and further analyzing the distribution of investments for various strategies for upgrading equipment has been proposed. It is noted that the proposed techniques are most effective for equipment with rapid obsolescence (mobile communications, computer equipment).

Keywords: dynamic programming, equipment replacement, strategy, Bellman function, unconditional optimization.

### Постановка проблемы.

Многие производственные, транспортные и управленческие задачи связаны с необходимостью выработки стратегий о пошаговом принятии решений. К ним относятся, например: задача о распределении инвестиций, задача об оптимальном маршруте, задача об обновлении оборудования. Все эти задачи носят дискретный характер и в большинстве своём описывают процессы, изменяющиеся во времени.

Исследование математических моделей, описывающих указанные процессы, привело к появлению такого раздела математической науки, как динамическое программирование.

В данной статье мы рассматриваем задачу об обновлении оборудования. Любое оборудование имеет свой срок службы. В процессе эксплуатации происходит его износ как физический, так и моральный. Соответственно, со временем уменьшается прибыль, поскольку возрастают затраты на ремонтное обслуживание и снижается его производительность. Возникает вопрос о замене (приобретении нового и утилизации изношенного оборудования). Однако срок службы не есть величина постоянная, в силу воздействия случайных факторов. Кроме того, все оборудование не может быть заменено одновременно (это требует больших материальных затрат).

В связи с этим становится актуальной задача о выработке оптимальной стратегии поэтапного обновления оборудования.



### Анализ последних достижений и публикаций

Методы динамического программирования основываются на принципе оптимальности Беллмана [1]: оптимальное решение, начиная с любого шага, зависит только от состояния системы на данном шаге и последующих решений. Алгоритм решения задачи об обновлении оборудования детально описан в [2]. Он основан на построении функции Беллмана, начиная с последнего шага (условная оптимизация) и последующего анализа и принятия решения о стратегии замены (безусловная оптимизация) [3].

В последнее время методы динамического программирования получили дальнейшее развитие [4,5], в связи с широким применением во многих областях человеческой деятельности. Влияние случайных факторов при замене оборудования рассмотрено в [6]. Ряд работ (например, [7]) посвящен разработке программного обеспечения данных методов. Однако, мало исследованной является проблема, возникающая при невозможности построения функции Беллмана. Также недостаточно уделено внимания безусловной оптимизации, в частности анализу экономической составляющей данной задачи.

### Цель исследования

Целью данной работы является рассмотрение способов преодоления проблемы, возникающей в результате невозможности вычисления функции Беллмана для оборудования возраста  $n$  лет, а также сравнительный анализ распределения прибылей, полученных при применении соответствующих стратегий на этапе безусловной оптимизации.

### Изложение основного материала исследования

Пусть мы имеем в своём распоряжении оборудование возраста от одного до  $n$  лет. В начале каждого года принимается решение о сохранении либо замене оборудования. Необходимо выработать стратегию поэтапного обновления оборудования на ближайшие  $n$  лет, обеспечивающую максимальную совокупную прибыль.

Уравнения Беллмана на последнем шаге имеют вид:

$$F_n(t) = \max \begin{cases} \text{Pr}(t) & \text{сохранение} \\ \text{Pr}(0) - p + S(t) & \text{замена} \end{cases},$$

а на каждом последующем –

$$F_k(t) = \max \begin{cases} \text{Pr}(t) + F_{k+1}(t+1) & \text{сохранение} \\ \text{Pr}(0) - p + F_{k+1}(1) + S(t) & \text{замена} \end{cases}.$$

Здесь  $t$  – возраст оборудования к началу определённого года;  $k$  – номер года в плановом периоде;  $\text{Pr}(t)$  – прибыль от эксплуатации оборудования возраста  $t$ ;  $S(t)$  – остаточная стоимость оборудования соответствующего возраста;  $p$  – цена нового оборудования;  $F_k(t)$  – максимально возможная прибыль за годы, начиная с  $k$ .

Отметим, что при  $\text{Pr}(t) + F_{k+1}(t+1) = \text{Pr}(0) - p + F_{k+1}(1) + S(t)$  целесообразно сохранить оборудование.

Однако, неисследованной является проблема, возникающая когда на некотором шаге  $F_k(n-1) = \text{Pr}(n-1) + F_{k+1}(n)$ , то есть оборудование возраста  $n-1$  год сохраняется. Тогда значение  $F_k(n)$  не может быть определено, поскольку  $F_{k+1}(n+1)$  – неизвестно, так как в плановом периоде  $n$  лет.

Мы рассмотрим три возможных способа разрешения данной проблемы.

1 способ. Не заполняем клетку со значением  $F_k(n)$  и переходим к следующему шагу. Но на одном из последующих шагов может оказаться, что мы не сможем определить  $F_k(n-1)$ . В самом неблагоприятном случае на 1-м году планового периода мы будем иметь информацию только о прибыли от эксплуатации оборудования возраста 1 год, что соответствует ситуации одновременной замены остального оборудования, которая, как отмечалось выше, требует больших затрат.

2 способ. Будем считать, что при  $t = n$  оборудование необходимо заменить. Однако в этом случае мы можем уменьшить суммарную прибыль, поскольку при дальнейшей эксплуатации оно, вполне возможно, могло бы дать большую прибыль, чем при замене.

3 способ. Увеличить плановый период, вводя прогнозируемые (фиктивные) значения прибыли и остаточной стоимости от эксплуатации оборудования большего возраста, чем имеющееся в наличии. После окончания расчетов, фиктивная часть таблицы отбрасывается. Эффективность этого способа зависит от достоверности прогнозируемых значений. С одной стороны, ликвидируются недостатки, возникающие при применении первого способа, а с другой – увеличение планового периода может привести к снижению уровня адекватности данной модели.



Рассмотрим абстрактный пример, который поможет провести сравнительный анализ результатов, полученных при применении предложенных выше подходов к решению поставленной задачи.

Будем рассматривать плановый период продолжительностью 6 лет. Данные о прибыли и остаточной стоимости оборудования возраста  $t$  приведены в таблице 1, а цена единицы нового оборудования –  $p = 14$  ден.ед.

Таблица 1

|         |    |   |   |   |   |   |   |
|---------|----|---|---|---|---|---|---|
| $t$     | 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $Pr(t)$ | 8  | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 |
| $S(t)$  | 12 | 8 | 6 | 4 | 2 | 2 | 2 |

Условная оптимизация.

Поскольку на шестом году  $Pr(0) - p = 8 - 14 = -6$ , то в начале этого года оборудование обновляться не будет. Вычисляя значения  $F_5(t)$ , приходим к выводу, что оборудование возраста от одного до пяти лет сохраняется, а значение

$$F_5(6) = \max \begin{cases} Pr(6) + F_6(7) \\ Pr(0) - p + F_6(1) + S(6) \end{cases}$$

не может быть найдено, так как нам неизвестно  $F_6(7)$ .

1-й способ.

Оставляем клетку, соответствующую  $F_5(6)$  пустой. Но в этом случае на следующем шаге мы не сможем вычислить  $F_4(5)$ , затем  $F_3(4)$ ,  $F_2(3)$  и  $F_1(2)$ . Результаты вычислений приведены в таблице 2 и размещены, начиная с первого года планового периода. Таким образом, мы имеем сведения исключительно о прибыли от эксплуатации оборудования возраста 1 год.

Отметим, что при применении этого способа матрица элементов таблицы не всегда является треугольной.

2-й способ.

Полагаем  $F_5(6) = Pr(0) - p + F_6(1) + S(6) = 8 - 14 + 7 + 2 = 3$ , т.е. считаем, что оборудование возраста 6 лет необходимо заменить. Результат приведен в таблице 3.

Слева от жирной линии находится область принятия решения о сохранении, а справа – о замене оборудования. Подчеркнутые элементы соответствуют случаю, когда в области, соответствующей решению о замене оборудования возникает ситуация, когда

$$Pr(t) + F_{k+1}(t+1) \geq Pr(0) - p + F_{k+1}(1) + S(t) \quad (1)$$

К причинам её возникновения и возможности решения данной проблемы мы вернёмся позже.

Таблица 2

|          |    |    |    |    |    |   |
|----------|----|----|----|----|----|---|
| $t$      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 |
| $F_1(t)$ | 37 |    |    |    |    |   |
| $F_2(t)$ | 32 | 30 |    |    |    |   |
| $F_3(t)$ | 26 | 25 | 23 |    |    |   |
| $F_4(t)$ | 20 | 19 | 18 | 17 |    |   |
| $F_5(t)$ | 14 | 13 | 12 | 12 | 11 |   |
| $F_6(t)$ | 7  | 7  | 6  | 6  | 6  | 5 |

Таблица 3

|          |    |    |    |           |           |    |
|----------|----|----|----|-----------|-----------|----|
| $t$      | 1  | 2  | 3  | 4         | 5         | 6  |
| $F_1(t)$ | 37 | 32 | 30 | <u>28</u> | <u>28</u> | 28 |
| $F_2(t)$ | 32 | 30 | 24 | <u>22</u> | <u>22</u> | 22 |
| $F_3(t)$ | 26 | 25 | 23 | 16        | 16        | 16 |
| $F_4(t)$ | 20 | 19 | 18 | 17        | 10        | 10 |
| $F_5(t)$ | 14 | 13 | 12 | 12        | 11        | 3  |
| $F_6(t)$ | 7  | 7  | 6  | 6         | 6         | 5  |

3-й способ.

Увеличим плановый период до 10 лет. Поскольку в нашем распоряжении нет оборудования, возраст которого превышает 6 лет, то мы рассчитываем прогнозируемые значения прибыли от эксплуатации и остаточной стоимости оборудования возраста от 7 до 10 лет (см. таблицу 4).

Сразу же отметим, что от точности прогноза будет зависеть уровень адекватности нашей модели, поэтому нежелательно значительно увеличивать плановый период. Поскольку нами поставлена задача о выработке стратегии на шесть лет, то полагаем значения функции  $F_n(t) = F_6(t)$ . Результаты вычислений приведены в таблице 5.

Таблица 4

| $t$     | 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| $Pr(t)$ | 8  | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 0  |
| $S(t)$  | 12 | 8 | 6 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1  |

Таблица 5

| $t$      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $F_1(t)$ | 37 | 34 | 30 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 27 |
| $F_2(t)$ | 32 | 30 | 27 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 21 |
| $F_3(t)$ | 26 | 25 | 23 | 21 | 18 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 |
| $F_4(t)$ | 20 | 19 | 18 | 17 | 15 | 12 | 10 | 10 | 10 | 9  |
| $F_5(t)$ | 14 | 13 | 12 | 12 | 11 | 9  | 7  | 5  | 3  | 2  |
| $F_6(t)$ | 7  | 7  | 6  | 6  | 6  | 5  | 4  | 3  | 2  | 0  |

Сравнивая результаты, полученные 2-м и 3-м способами, замечаем, что прибыли, полученные за шесть лет, отличаются несущественно. Однако, существенно отличаются стратегии обновления, что кардинально влияет на распределение, полученной по годам прибыли.

Таким образом, мы переходим к безусловной оптимизации.

Для простоты изложения будем считать, что к началу первого года мы имеем шесть единиц оборудования, по одной возраста от одного до шести лет.

При использовании 1-го способа мы принимаем стратегию замены в начале 1-го года всего оборудования возрастом более одного года. Поскольку оборудование, возраст которого составляет к началу 1-го года один год, в последствии не обновляется, то мы будем иметь на протяжении следующих шести лет оборудование возраста только  $t$  и  $t+1$  год.

Тогда к началу второго года имеем пять единиц оборудования возраста 1 год и одну единицу – возраста 2 года и т.д. (см. таблицу 6).

При применении 2-го способа получаем тот же результат. Но, оказывается (см. таблицу 3), в начале первого года мы можем не менять оборудование возраста 4 и 5 лет, поскольку для него прибыль от сохранения и замены одинаковы. Отметим, что может возникнуть ситуация когда в области замены прибыль от продолжения эксплуатации оборудования выше чем от его замены (см.(1)). Эта ситуация объясняется тем, что остаточная стоимость оборудования возраста три года, выше чем  $S(4)$  и  $S(5)$ , а прибыли от их эксплуатации одинаковы.

В этом случае мы можем не менять оборудование данного возраста. Тогда к началу 2-го года имеем три единицы оборудования возраста 1 год и по одной возраста 2, 5 и 6 лет. При этом оборудование шестилетнего возраста заменяется, а четырех и пятилетнего может эксплуатироваться дальше. Но оборудования возраста 4 года в наличии нет, так как оно было обновлено в предыдущем году. В таблице 7 приведено распределение оборудования по возрасту в каждом году планового периода.

Таблица 6

| $t$      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|---|---|---|---|---|
| $K_1(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $K_2(t)$ | 5 | 1 |   |   |   |   |
| $K_3(t)$ |   | 5 | 1 |   |   |   |
| $K_4(t)$ |   |   | 5 | 1 |   |   |
| $K_5(t)$ |   |   |   | 5 | 1 |   |
| $K_6(t)$ |   |   |   |   | 5 | 1 |

Таблица 7

| $t$      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|---|---|---|---|---|
| $K_1(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $K_2(t)$ | 3 | 1 |   |   | 1 | 1 |
| $K_3(t)$ | 1 | 3 | 1 |   |   | 1 |
| $K_4(t)$ | 1 | 1 | 3 | 1 |   |   |
| $K_5(t)$ |   | 1 | 1 | 3 | 1 |   |
| $K_6(t)$ |   |   | 1 | 1 | 3 | 1 |

В таблице 8 приведены результаты, полученные 3-м способом. Мы видим, что в начале 1-го, 2-го и 3-го годов заменяется оборудование возраста 6 лет, а в 4-м, 5-м и 6-м годах оборудование не обновляется. При этом в пятом году планового периода мы имеем в наличии оборудование возраста 7 лет, а в шестом – 7 и 8 лет.

Таблица 8

| $t$      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_1(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |
| $K_2(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |
| $K_3(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |
| $K_4(t)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |
| $K_5(t)$ |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |
| $K_6(t)$ |   |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Рассмотрим теперь, как будут распределены прибыли по годам. Прибыль в каждом году можно получить из формулы

$$GPr(t) = \sum_{i=1}^n (K_i(t)F_i(t) - K_i(t+1)F_{i+1}(t)).$$

Например, для первого года: из прибыли за шесть лет вычитаем прибыль за пять лет, начиная со второго. Здесь  $K_i(t)$  – количество единиц оборудования соответствующего возраста.

Для 1-го способа

$$GPr_1(1) = 37 + 32 + 30 + 28 + 28 + 28 - (5 \cdot 32 + 30) = -7.$$

Действительно, в начале первого года 5 единиц оборудования будет заменено, и к началу второго года будем иметь пять единиц возраста 1 год и одну единицу возраста 2 года.

При применении 2-го способа, имеем

$$GPr_2(1) = 37 + 32 + 30 + 28 + 28 + 28 - (3 \cdot 32 + 30 + 22 + 22) = 13.$$

И наконец, для 3-го способа

$$GPr_3(1) = 37 + 34 + 30 + 28 + 28 + 28 - (32 + 30 + 27 + 24 + 22 + 22) = 28.$$

В таблице 9 приведено распределение прибыли по годам при применении стратегии обновления, полученной каждым из трёх способов.

Таблица 9

| $t$        | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|------------|----|----|----|----|----|----|
| $GPr_1(t)$ | -7 | 42 | 41 | 36 | 35 | 36 |
| $GPr_2(t)$ | 13 | 30 | 28 | 40 | 37 | 35 |
| $GPr_3(t)$ | 28 | 28 | 28 | 37 | 34 | 30 |

Сравнивая их, мы видим, что в первом году планового периода третья стратегия является наилучшей, а первая – наихудшей. Эта тенденция сохраняется, если рассмотреть прибыль за первые два года. К концу третьего года прибыль, полученная при применении второй стратегии, будет уже меньше, чем при применении первой и третьей. Окончательное решение о применении одной из стратегий принимает менеджер, исходя из анализа прогнозируемых прибылей. Это может быть обусловлено его отношением к инновациям, доверием или недоверием к прогнозам, а также склонностью к оптимизму или пессимизму.

### Выводы

Таким образом, мы рассмотрели три подхода к выработке стратегии обновления оборудования в случае, когда значение функции Беллмана на некотором этапе не может быть определено, а также

ситуацию, когда в области замены возникают элементы, соответствующие стратегии сохранения. Отметим, что возможен и четвёртый подход к решению поставленной задачи. Он основывается на введении фиктивных значений прибылей и остаточных стоимостей и построении функции Беллмана для всего полученного периода. Мы не провели также анализ распределения инвестиций. Этим вопросам будут посвящены следующие работы.

Несмотря на то, что прибыли и остаточные стоимости оборудования приведены к ценам первого года (т.е. учтена инфляция), мы не можем достаточно точно прогнозировать соотношения цен благ, влияющих на них. Поэтому при увеличении планового периода уровень адекватности модели снижается.

Достаточно эффективной она является для оборудования с быстрым моральным износом (например, компьютерная техника и средства мобильной связи).

#### Список использованной литературы

1. Bellman, R. Dynamic Programming. Princeton, 1957. 339 p.
2. Taha H. Operations Research: An Introduction. London, 1976. 648 p.
3. Фомин Г. П. Математические методы и модели в коммерческой деятельности. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 544 с.
4. Denardo, E.V. Dynamic Programming: Models and Applications. New York, 2012. 240 p.
5. Bertsekas, D.P. Dynamic Programming and Optimal Control Belmont, Massachusetts, 2012. 1270 p.
6. Gelrud, Ya.D., Gollay A.V. Mathematical Models of Replacement and Wearing of Equipment *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2018. Т. 18, № 2. С. 121–130.
7. Шумейко О.А. Динамічна модель оптимального розподілу інвестицій при заміні обладнання./ *Економіка – математичне моделювання соціально-економічних систем* №17. 2012, С. 255-267.

#### References

1. Bellman, R. Dynamic Programming. Princeton, 1957. 339 p.
2. Taha H. Operations Research: An Introduction. London, 1976. 648 p.
3. Fomin G. P. Matematicheskie metody i modeli v kommercheskoy deyatel'nosti. – M.: Finansy i statistika, 2001. – 544 s.
4. Denardo, E.V. Dynamic Programming: Models and Applications. New York, 2012. 240 p.
5. Bertsekas, D.P. Dynamic Programming and Optimal Control Belmont, Massachusetts, 2012. 1270 p.
6. Gelrud, Ya.D., Gollay A.V. Mathematical Models of Replacement and Wearing of Equipment *Vestnik YuUrGU. Seriya «Kompyuternyye tehnologii, upravlenie, radioelektronika»*. 2018. T. 18, # 2. S. 121–130.
7. Shumeiko O.A. Dynamichna model optymal'nogo rozpodilu investytsii pry zaminni obladnannia./ *Ekonomiko – matematychnye modeliuvannia sotsialno-ekonomichnykh system* №17. 2012, S. 255-267.

УДК 004.93

Л.Г. АХМЕТШИНА, А.А. ЕГОРОВ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

## СЕГМЕНТАЦИЯ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОРТОГОНАЛЬНОМ БАЗИСЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Сегментация изображений предполагает выделение однородных областей или объектов интереса и является важным шагом его анализа. Неоднозначность этого процесса обусловлена неточностью в исходных данных, методе решения и в способе формирования результата. Одним из способов осуществления сегментации является выполнение кластеризации с последующей визуализацией ее результатов. Использование нечеткой кластеризации повышает достоверность сегментации благодаря учету неопределенности. Информативность конечного результата сегментации на основе нечеткой кластеризации зависит от многих факторов, в частности, от способа дефаззификации. Дефаззификация производится на основе функций принадлежности всех классов, каждый из которых содержит значимую информацию. В работе рассмотрен метод адаптивной визуализации результатов нечеткой (нейро-фаззи) кластеризации изображений с использованием различных ортогональных преобразований (Грама-Шмидта, сингулярного разложения, нечеткого метода главных компонент). Для обеспечения возможности их выполнения при обработке полутонового изображения формируется многомерное пространство признаков. В данной работе также осуществляется автоматическое определение наиболее значимых столбцов матрицы, полученной при выполнении ортогонального преобразования, которые и формируют результирующее изображение на основе взвешенной суммы. Это позволяет выполнять визуализацию результатов нечеткой кластеризации в автоматическом режиме. Коэффициенты этой взвешенной суммы пропорциональны важности вклада каждого столбца. Представлен алгоритм и экспериментальные результаты сегментации на примере обработки полутоновых медицинских изображений для различных типов ортогональных преобразований. Результаты демонстрируют влияние типа применяемого ортогонального преобразования на уровень детализации результатов сегментации полутоновых изображений.

Ключевые слова: обработка изображений, сегментация, нечеткая (нейро-фаззи) кластеризация, визуализация результатов нечеткой кластеризации, ортогональное преобразование.

Л.Г. АХМЕТШИНА, А.О. ЕГОРОВ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

## СЕГМЕНТАЦИЯ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ У ОРТОГОНАЛЬНОМУ БАЗИСЕ ФУНКЦИЙ НАЛЕЖНОСТИ НЕЧІТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

Сегментація зображень передбачає виділення однорідних областей або об'єктів інтересу і є важливим кроком його аналізу. Неоднозначність цього процесу обумовлена неточністю у вхідних даних, методі розв'язку та в способі формування результату. Одним із способів здійснення сегментації є виконання кластеризації з наступною візуалізацією її результатів. Використання нечіткої кластеризації підвищує достовірність сегментації завдяки рахуванню невизначеності. Інформативність кінцевого результату сегментації на основі нечіткої кластеризації залежить від багатьох факторів, зокрема, від способу дефаззифікації. Дефаззифікація здійснюється на основі функцій приналежності всіх класів, кожен з яких містить значущу інформацію. В цій праці розглянуто метод адаптивної візуалізації результатів нечіткої (нейро-фаззи) кластеризації зображень з використанням різних ортогональних перетворень (Грама-Шмідта, сингулярного розкладення, нечіткого методу головних компонентів). Для забезпечення їх виконання при обробці напівтонового зображення формується багатовимірний простір ознак. В цій статті також здійснюється автоматичне визначення найбільш значущих стовбців матриці, яка отримана при виконанні ортогонального перетворення, які і формують кінцеве зображення на основі зваженої суми. Це дозволяє виконувати візуалізацію результатів нечіткої кластеризації в автоматичному режимі. Коефіцієнти цієї зваженої суми пропорційні важливості внеску кожного стовпця. Наведено алгоритм та експериментальні результати сегментації на прикладі обробки напівтонових медичних зображень для різних типів ортогональних перетворень. Результати демонструють вплив типу застосованого ортогонального перетворення на рівень деталізації результатів сегментації напівтонових зображень.

Ключові слова: обробка зображень, сегментація, нечітка (нейро-фаззи) кластеризація, візуалізація результатів нечіткої кластеризації, ортогональне перетворення.

L.G. AKHMETSHINA, A. A. YEGOROV  
Oles Honchar Dnipro National University

## LOW-CONTRAST IMAGE SEGMENTATION IN THE ORTHOGONAL BASIS OF FUZZY CLUSTERING MEMBERSHIP FUNCTIONS

*Images segmentation supposes selecting homogeneous areas or objects of interest. It is an important step of image analysis. This process ambiguity is conditioned of inaccuracy of source data, solving method and method of result forming. One of the ways of segmentation implementing is running the clustering process with further visualizing its results. Fuzzy clustering usage increases segmentation reliability due to taking into account of uncertainty. Self-descriptiveness of segmentation result based on fuzzy clustering depends on a lot of different factors, including defuzzification method. Defuzzification is produced based on membership functions for all classes. Each class contains significant information. This paper describes the adaptive visualizing method of images fuzzy (neuro-fuzzy) clustering results based on usage of different orthogonal transformations (Gram-Schmidt process, singular value decomposition, fuzzy principal components analysis). For providing the ability of running orthogonal transformations for grayscale images processing multidimensional characters space is formed. Also in this paper automatic detection the most important columns of matrix (the result of orthogonal transformation) is provided. These columns form the resulting image based on weighted sum. It allows performing fuzzy clustering results visualizing in automatic mode. Coefficients of this weighted sum are proportional to importance of each column. Algorithm and experimental results of segmentation on example of grayscale medical images processing for different orthogonal transformations types are shown. These results demonstrate the influence of using of orthogonal transformation type on the level of detailing of grayscale images segmentation results.*

*Keywords: image processing, segmentation, fuzzy (neuro-fuzzy) clustering, visualizing of fuzzy clustering results, orthogonal transformations.*

**Постановка проблеми.** Количество практических задач, связанных с цифровой обработкой изображений, являющихся результатом стандартных методов исследования, например, в медицине, геофизике, спутниковом мониторинге Земли, постоянно возрастает. Сегментация изображений является одной из важнейших и, при этом, неоднозначных процедур, относящихся к методам высокого уровня обработки [1]. Целью является выделение составляющих с однородными свойствами с целью выявления объектов интереса. При этом, значительное число трудностей возникает из-за того, что исходные данные, цели и требования к результату являются достаточно неоднозначными. Кроме случайности, которая может описываться и учитываться в соответствии с теорией вероятности, в изображениях присутствуют дополнительные виды неопределенности, такие как двусмысленность серого, геометрическая нечеткость, отсутствие знаний о наличии и характеристиках объектов интереса, а также и системе их формирования. В таких условиях эффективным методом сегментации является выполнение нечеткой кластеризации с последующей визуализацией ее результатов [2].

**Анализ публикаций по теме исследования.** В настоящее время популярным методом выполнения кластеризации является применение нечетких алгоритмов, например, FCM (Fuzzy C-Means), который позволяет учесть неопределенность, присутствующую в изображении, путем определения и дальнейшего анализа функций принадлежности объектов к различным классам. Недостатком данного подхода является неоднозначность процесса дефазификации, которая, в свою очередь, порождает сложности с визуализацией конечного результата. В работах [3, 4] было предложено использование сингулярного разложения для автоматического определения значимых столбцов нечеткой функции принадлежности, получаемой в результате нечеткой кластеризации, при решении задач сегментации полутоновых изображений.

**Цель статьи.** В работе рассматривается влияние вида ортогонального преобразования нечеткой функции принадлежности при визуализации результатов нечеткой кластеризации на чувствительность и достоверность сегментации полутоновых слабоконтрастных изображений.

**Основная часть.** Предложенный алгоритм сегментации состоит из следующих шагов.

1. Осуществляется нечеткая кластеризация исходного изображения  $I$  размерности  $dy \times dx$  ( $dy$  и  $dx$  – количество пикселей по вертикали и горизонтали, соответственно) в результате чего формируется нечеткая функция принадлежности  $U$  размерности  $n \times c$  ( $n = dy \cdot dx$ ,  $c$  – количество нечетких кластеров). Основной целью этого шага является расширение пространства входных признаков, что позволяет учитывать дополнительную информацию при сегментации.
2. Формируется матрица  $I^1$ , содержащая матрицы  $I$  и  $U$  или только  $U$  в зависимости от применяемого ортогонального преобразования.
3. К матрице  $I^1$  применяется ортогональное преобразование и формируются матрицы  $I_o^1$



(размерность совпадает с размерностью исходного изображения) и вектор коэффициентов  $C$  (его формирование зависит от ортогонального преобразования).

4. Вектор коэффициентов  $C$  упорядочивается по убыванию, а его элементы нормируются так, чтобы их сумма была равна 1.
5. Столбцы  $I_o^1$  масштабируются на отрезок  $[0,1]$  и интерпретируются как многомерное изображение. В результате выполнения этого шага формируется матрица  $I^2$ .
6. Формируется вектор  $dC$ , содержащий разности для каждой пары соседних элементов вектора  $C$ .
7. Вычисляется значение  $dC_a$  по формуле:

$$dC_a = \left( \left( \sum_{j=1}^c dC_j / c \right) + (dC_{\min} + dC_{\max}) / 2 \right) / 2, \quad (1)$$

где  $dC_{\min}$  и  $dC_{\max}$  – минимальный и максимальный элементы вектора  $dC$ , соответственно.

8. На основе значения  $dC_a$  при просмотре элементов  $dC$  с конца выбирается индекс  $i_{\max}$ :  $dC_{i_{\max}} \geq dC_a$ . Элементы вектора  $dC$  с индексами от 1 до  $i_{\max} + 1$  нормируются так, чтобы их сумма была равна 1.
9. Формируется выходное полутоновое изображение  $I^3$  по формуле:

$$I_{y,x}^3 = \sum_{i=1}^{i_{\max}+1} I_{y,x,i}^2 \cdot dC_i, y \in [1, dy], x \in [1, dx]. \quad (2)$$

В данной статье рассматриваются следующие ортогональные преобразования:

1. Сингулярное разложение [5]. В этом случае матрица  $I^1$  содержит матрицы  $I$  и  $U$ , а  $I_o^1$  удовлетворяет следующему соотношению:

$$I^1 = I_o^1 \cdot S_s \cdot (V_s)^T, \quad (3)$$

причем  $I_o^1$  содержит левые сингулярные вектора и ее размерность совпадает с  $I^1$  ( $n \times (1+c)$ ),  $S_s$  и  $V_s$  имеют размерность  $(1+c) \times (1+c)$ , т.к. используется экономное представление сингулярного разложения, и содержат собственные числа и правые сингулярные вектора, соответственно.

Вектор коэффициентов  $C$  вычисляется следующим образом:

$$C_i = \left( \left| \sum_{j=1}^{1+c} (V_s)_{i,j} \right| + \left| \sum_{j=1}^{1+c} (V_s)_{j,i} \right| \right) / 2, i \in [1, 1+c]. \quad (4)$$

2. Преобразование Грамма-Шмидта. При его использовании матрица  $I^1$  содержит только матрицу  $I$ , а  $I_o^1$  формируется в соответствии со следующим соотношением (используется экономное преобразование):

$$I^1 \cdot E = I_o^1 \cdot R, \quad (5)$$

причем размерности матриц  $I^1$  и  $I_o^1$  совпадают ( $n \times c$ ),  $R$  (верхняя треугольная матрица) имеет размерность  $c \times c$ , а  $E$  (матрица перестановок) –  $1 \times c$ .

Вычисление вектора  $C$  происходит следующим образом:

$$C_i = \left( \sum_{j=1}^c R_{j,i} - \sum_{j=1}^c R_{i,j} \right) / d_i, i \in [1, 1+c], \quad (6)$$

где  $d$  – вектор, содержащий элементы главной диагонали матрицы  $R$ .

3. Метод нечетких главных компонент (FPCA), описанный в работе [6]. В этом случае, как и для сингулярного разложения,  $I^1$  содержит матрицы  $I$  и  $U$ . Матрица  $I_o^1$  (размерностью  $n \times (1+c)$ ) соответствует матрице счетов (Scores), которая вычисляется итеративно на основе исходных данных и внутренней матрицы  $W$  (изначально содержит матрицу правых сингулярных векторов сингулярного разложения, значения которой итеративно изменяются). На основании этой же матрицы  $W$  вычисляется матрица нагрузок (Loads)  $L$  (размерностью  $(1+di) \times (1+di)$ ). Вектор  $C$  формируется так:

$$C_i = \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^{1+di} L_{i,j} \right| + \max_i^r} + \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^{1+di} L_{j,i} \right| + \max_i^c}, i \in [1, 1+di], \quad (7)$$

где  $\max^r$  и  $\max^c$  – вектора максимальных значений по строкам и столбцам матрицы  $L$ , соответственно.

**Экспериментальные результаты.** Предложенный в данной статье алгоритм был применен при сегментации различных полутоновых изображений, примерами которых могут служить снимки на рис. 1

На рис. 1 а приведена томограмма головного мозга, полученная с целью диагностики наличия гематомы, а также определения области ее влияния в случае выявления. По гистограмме исходного изображения (рис. 1 б) можно сказать, что, изображение не является низкоконтрастным. Однако диагностирование гематомы по исходному снимку затруднено из-за ее расположения на низкоконтрастном участке изображения (фрагмент, обведенный прямоугольником), а область ее влияния визуально неразличима. Введение рентгеноконтрастного вещества (рис. 1 в) позволяет более четко выделить гематому, однако не выявляет области ее влияния.

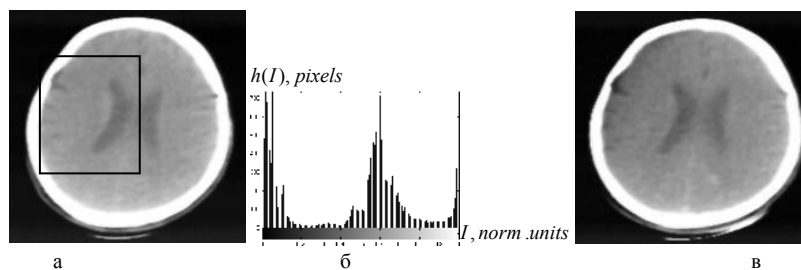


Рис. 1. Рентгеновская томограмма головного мозга: а – исходный полутоновый снимок (204x201); б – гистограмма; в – результаты введения рентгеноконтрастного вещества

Для выполнения кластеризации был использован алгоритм sFCM [7]. При этом динамическое сжатие и преобразование функции принадлежности не выполнялось. Перед обучением карты Кохонена (SOM) число нечетких кластеров увеличивалось в 4 раза (упорядочивание исходных центроидов осуществлялось на основе матрицы Евклидовых расстояний), а после обучения SOM исходное число нейронов выбиралось на основе максимального соответствия. Максимальное количество итераций – 100,  $\varepsilon = 10^{-5}$ , количество нечетких кластеров  $c = 6$ .

На рис. 2 а – рис. 2 е приведена визуализация функций принадлежности (после применения к ним эквализации гистограмм) к 1-ому – 6-ому нечеткому кластеру, соответственно, которые были получены в результате кластеризации изображения на рис. 1 а.

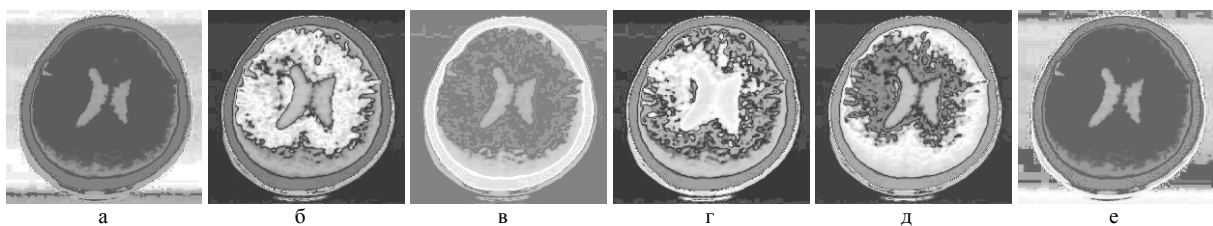


Рис. 2. Результаты кластеризации изображения на рис. 1. а: визуализация функции принадлежности к 1-му (а) – 6-му (е) нечетким кластерам, соответственно

На рис. 3 представлены результаты визуализации компонент изображения  $I^2$  (получено при выполнении преобразования Грамма-Шмидта нечеткой функции принадлежности, отображенной на рис. 2), которые интерпретированы как изображения (после выполнения эквализации гистограмм). Наиболее информативными для диагностики наличия гематомы и области ее влияния являются 2-ая, 3-я, а также 4-ая, 5-ая и 6-ая компоненты изображения  $I^2$  (рис. 3 б – е, соответственно). При этом наибольшей информативностью обладают компоненты 2 и 6. 1-ая компонента (рис. 3 а) не позволяет выделить область влияния гематомы.

Вектор  $C$  в данном случае будет содержать следующие элементы:  $C = [-0.1885; 0.4111; 0.1032; -0.2418; -0.3173; 0.2387]$ . Таким образом, наиболее информативными будут выбраны 2-ая, 6-ая и 3-я компоненты изображения  $I^2$ . В целом, это соответствует

информативности изображений на рис. 3. (2-ое изображение (рис. 3 б) наилучшим образом отделяет саму гематому от области ее влияния).

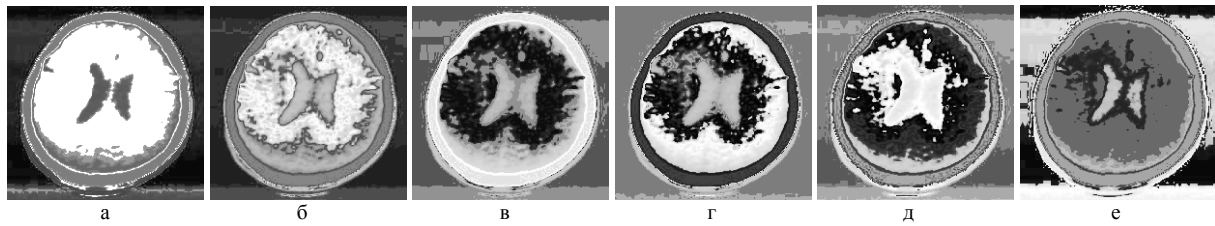


Рис. 3. Компоненты многомерного изображения  $I^2$ , полученного на шаге 5 предложенного алгоритма, для снимка на рис. 1. а в случае применения преобразования Грамма-Шмидта

На рис. 4 представлены результаты визуализации компонент изображения  $I^2$  (получено при использовании алгоритма FPCA для исходного изображения (рис. 1 а) и нечеткой функции принадлежности, отображенной на рис. 2), которые интерпретированы как изображения (после выполнения эквализации гистограмм). Наиболее информативными для диагностики наличия гематомы и области ее влияния являются 3-я, 4-я, а также 7-я компоненты изображения  $I^2$  (рис. 4 в, г, ж, соответственно). 2-ая и 6-ая компоненты имеют низкий контраст/яркость (рис. 4 б, е, соответственно). 1-ая компонента (рис. 4 а) не позволяет выделить область влияния гематомы.

Вектор  $C$  при этом будет содержать следующие элементы:  $C = [1.0273; 0.8339; 2.0812; 2.0975; 1.9032; 1.1223]$ . Наиболее информативными будут выбраны 4-ая, 3-ая, 5-ая, 6-ая и 7-ая компоненты изображения  $I^2$ . В целом, это соответствует информативности изображений на рис. 4 (3-е и 4-ое и 7-ое изображения (рис. 4 в, г, ж) наилучшим образом отделяет саму гематому от области ее влияния). Хотя в данном случае не удалось добиться соответствующего порядка выбора (что отражается в весовых коэффициентах в итоговой взвешенной сумме) – 7-ая компонента должна была бы иметь больший индекс,

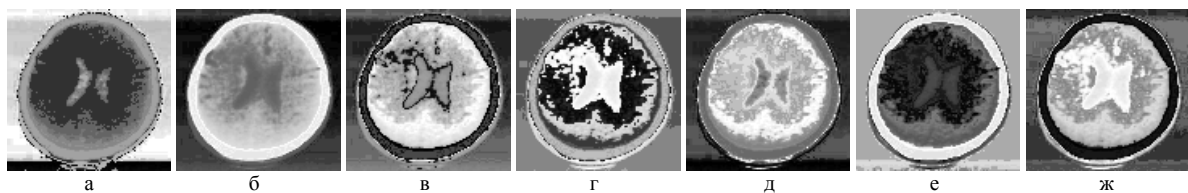


Рис. 4. Компоненты многомерного изображения  $I^2$ , полученной на шаге 5 предложенного алгоритма, для снимка на рис. 1. а в случае применения алгоритма FPCA

На рис. 5 приведены итоговые изображения (результат сегментации) при использовании всех 3-ех алгоритмов ортогонализации. В целом применение всех 3-ех алгоритмов ортогонализации позволяет выделить объекты интереса. При этом использование сингулярного разложения (рис. 5 а) приводит к получению недостаточного уровня яркости, в то время как разложение Грамма-Шмидта (рис. 5 б) и алгоритм FPCA (рис. 5 в) приводят к получению похожих по детализации и уровню яркости/контраста результатов. В двух последних случаях (рис. 5 б, в) следует отметить несколько лучшую степень детализации, чем при применении сингулярного разложения.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Вид ортогонального преобразования оказывает влияние на детализацию результатов сегментации полутоновых изображений.
2. Использование преобразования Грамма-Шмидта и алгоритма FPCA обеспечивает несколько более высокий уровень детализации.
3. Перспективным направлением исследований является усовершенствование способа формирования вектора  $C$ , используемого для автоматического отбора наиболее значимых компонент полученного после ортогонального преобразования многомерного изображения.

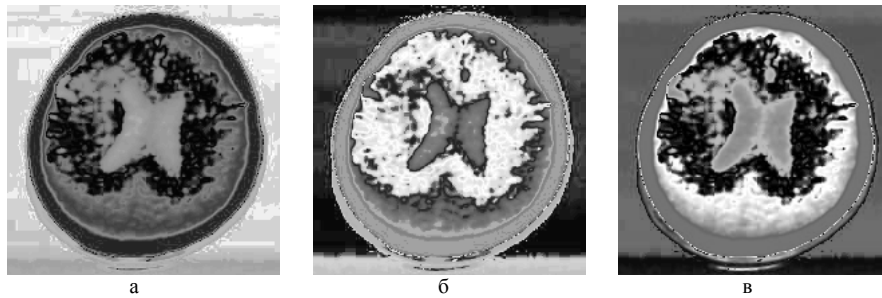


Рис. 5. Сегментация изображения на рис. 1. а – сингулярного разложения, б –преобразования Грамма-Шмидта, в –алгоритма FPCA

#### Список использованной литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П.А.Чочиа. М. : Техносфера, 2006. 1070 с.
2. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. С.Пб. : БХВ–Петербург, 2003. 719 с.
3. Ахметшина Л.Г., Егоров А.А. Метод адаптивной визуализации при сегментации изображений на основе сингулярного разложения. *Искусственный интеллект*. 2015. № 1-2. С. 36–43.
4. Ахметшина Л.Г., Егоров А.А. Адаптивная нечеткая сегментация изображений на основе комбинированного сингулярного разложения. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2016. № 3(58). С. 171–175.
5. Форсайт Дж., Моллер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений / под ред. Г.И. Марчука. М. : Мир, 1968. 167 с.
6. Horia F. Pop Principal Component Analysis Based on a Fuzzy Sets Approach. *Studia Univ. Babes–Bolyai, Informatica*. 2001. Vol. XLVI, № 2. P. 45–52.
7. Егоров А., Ахметшина Л. Оптимизация яркости изображений на основе нейро-фаззи технологий : монография. Изд. Lambert, 2015. 139 с.

#### References

1. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy / per. s angl. pod red. P.A.Chochia. M. : Tehnosfera, 2006. 1070 s.
2. Leonenkov A. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. S.Pb. : BHV–Peterburg, 2003. 719 s.
3. Akhmetshina L.G., Yegorov A.A. Metod adaptivnoy vizualizatsii pri segmentatsii izobrazheniy na osnove singulyarnogo razlozheniya. *Iskusstvennyiye intellekt*. 2015. No 1-2. S. 36
4. Akhmetshina L.G., Yegorov A.A. Adaptivnaya nechetkaya segmentatsiya izobrazheniy na osnove kombinirovannogo singulyarnogo razlozheniya. *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnikeskogo universiteta*. 2016. No 3(58). S. 171
5. Forsayt Dzh., Moller K. Chislennoe reshenie sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy / pod red. G.I. Marchuka. M. : Mir, 1968. 167 s.
6. Horia F. Pop Principal Component Analysis Based on a Fuzzy Sets Approach. *Studia Univ. Babes–Bolyai, Informatica*. 2001. Vol. XLVI, № 2. P. 45–52
7. Yegorov A., Akhmetshina L. Optimizatsiya yarkosti izobrazheniy na osnove neyro-fazzi tehnologiy : monografiya. Izd. Lambert, 2015. 139 c.

УДК 519.246.85

И.В. БАКЛАН, А.К. ОЧЕРЕТЯНИЙ, Я.И. БАКЛАН

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им.Игоря Сикорского»

**КУБ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ  
ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

*В статье представлен анализ современного подхода к моделированию языков программирования на основе гибридизации основных парадигм – императивного, логического и функционального программирования. Представлена концепция классификации этих процессов в виде куба математических теорий. Рассматривается пример представления одного из узлов куба в виде лямбда-куба теорий функционального программирования. Дается подход к формализации попарной гибридизации основных парадигм.*

*Ключевые слова:* математическая теория, парадигма программирования, гибридизация, лямбда-куб, куб математических теорий.

I.V. BAKLAN, O.K. OCHERETIANY, Y.I. BAKLAN

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського»

**КУБ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕОРІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ГИБРИДНИХ МОВ ПРОГРАМУВАННЯ**

*У статті представлений аналіз сучасного підходу до моделювання мов програмування на основі гібридизації основних парадигм - імперативного, логічного і функціонального програмування. Представлена концепція класифікації цих процесів у вигляді куба математичних теорій. Розглядається приклад уявлення одного з вузлів куба у вигляді лямбда-куба теорій функціонального програмування. Дається підхід до формалізації попарної гібридизації основних парадигм..*

*Ключові слова:* математична теорія, парадигма програмування, гібридизація, лямбда-куб, куб математичних теорій.

I.V. BAKLAN, O.K. OCHERETIANY, Y.I. BAKLAN

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Polytechnic Institute"

**CUBE OF MATHEMATICAL THEORIES OF MODELING HYBRID PROGRAMMING  
LANGUAGES**

*The article presents an analysis of the modern approach to modeling programming languages based on the hybridization of the main paradigms - imperative, logical and functional programming. The concept of classification of these processes in the form of a cube of mathematical theories is presented. An example of the representation of one of the nodes of a cube in the form of a lambda cube of functional programming theories is considered. An approach to the formalization of pairwise hybridization of the main paradigms is given. The main methods for describing the semantics of programming languages based on formal systems (mathematical theories): operational semantics, denotation semantics, axiomatic semantics, lambda calculus, algebraic semantics, action semantics.*

*Based on the analysis of existing programming languages and mathematical theories that underlie these languages, it is necessary to distinguish three main programming paradigms: imperative programming, functional programming, logical programming. Each of these paradigms is associated with specific mathematical theories. So the following known formalisms can be based on the language of the imperative programming paradigm: normal Markov algorithms, Post machine, Turing machine. The basis for the functional paradigm is the lambda calculus of Alonso Church. Languages of the logical programming paradigm may include calculus of expressions, calculus of predicates (first order logic), calculus of resolutions, theory of proving theorems.*

*The programming paradigm hybridization cube is a visual classification of eight possible hybrids. Any programming language from the point of view of semantics can be considered as a set of functional elements (fels) that can be expressed in terms of a formal system. Then the process of hybridization can be considered as the construction of a hybrid formal system based on two separate systems. During a hybridization operation, theories can integrate sets of their functional elements that carry different semantics, or the result of the interaction of functional elements from different formal systems to produce a hybrid functional element.*

*Keywords:* mathematical theory, programming paradigm, hybridization, lambda-cube, cube of mathematical theories.



### Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку підходів до створення програмного забезпечення передбачає появу нових засобів – мов програмування, які поєднують у собі функціональні можливості основних парадигм програмування.

Враховуючи той факт, що кожна з парадигм базується на певних математичних теоріях, стоїть в першу чергу завдання гібридизації теорій з наступним відображенням отриманої гібридної теорії у деяку метамову програмування [1].

За думкою авторів наглядним зображенням взаємодії під час гібридизації може стати куб математичних теорій, які лежать в основі основних парадигм програмування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналізуючи великомасштабні комерційні IT-проекти сьогодні, зазвичай виявляється, що використовуються п'ять або більше мов навіть у "чистому Java-проекті". HTML та JavaScript можуть бути використані для графічного програмування, SQL або EJBQL для доступу до баз даних, UML для моделювання даних, Perl для генератора, UML для Java, BPEL для логіки процесу та декілька скриптів XML для конфігурації. Чому проекти стикаються із великими затратами на підтримку частин на багатьох технологіях? Тому, що різні домени проблем вимагають різних конструкцій мови.

Це основна ідея парадигми мовно-орієнтованого програмування (Уорд, 1994; Фаулер, 2005; Дмитрієв, 2005; Брауер та ін., 2008) [2] – [5]. Її можна коротко підсумувати наступним чином. Коли вам доведеться вирішити складну проблему, спочатку виберіть - або, якщо необхідно, розробіть - найбільш відповідну для цієї проблеми мову. Потім реалізуйте рішення на цій мові.

Для коректної побудови мов, які передбачаються мовно-орієнтовним програмуванням, необхідне поєднання принципів із різних парадигм, що і розглядається надалі.

Методи опису мов програмування представлені в багатьох роботах [6] – [11] за останні 30 років.

### Мета дослідження

Метою дослідження є узагальнення шляхів опису різноманітних парадигм програмування для розв'язання задач створення нових мов програмування на основі гібридизації формальних систем парадигм. Класифікація методів гібридизації та їх взаємозв'язок подається у вигляді куба формальних систем для моделювання гібридних мов програмування.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Основні методи опису семантики мов програмування на основі формальних систем (математичних теорій): оперативна семантика, денотаційна семантика, аксіоматична семантика, лямбда-числення, алгебраїчна семантика, семантика дій.

Надалі приведений стислий опис наведених семантик.

Неформальна *оперативна семантика* ілюструє основні компоненти опціонального підходу до значень. Стан або конфігурація машини описується за допомогою деякого подання символів, таких як мічені поля, значення в полях та стрілки між ними. Одна конфігурація передбачає роль початкового стану, а функція, визначена програмою, значення якої пояснюється, переносить одну конфігурацію в іншу. Коли програма (або програміст) вичерпана або функція переходу з якоїсь причини не визначена, процес зупиняється, створюючи «остаточну» конфігурацію, яку ми вважаємо результатом програми.

За допомогою формальної семантики ми надаємо зміст програмам, відображаючи їх у деякій абстрактній, але точній області об'єктів. Використовуючи *денотаційну семантику*, ми надаємо значення з точки зору математичних об'єктів, таких як цілі числа, значення істинності, кортежі значень та функції. Для цього реально денотаційну семантику спочатку називали математичною семантикою. Хоча спочатку денотаційна семантика замислювалася як механізм для аналізу мов програмування, вона стала потужним інструментом для розробки та впровадження мови.

Позначення денотаційної семантики будуються на основі лямбда-числення. Мета денотаційної семантики полягає у наданні математичних описів мов програмування незалежно від їх експлуатаційної поведінки. Розширене лямбда-числення служить математичним формалізмом, металінгвістикою для денотаційних визначень. Як і у всіх математичних формальних формах, ми повинні знати, що лямбда-числення має модель для того, щоб визначення не були безглуздими. Крім того, денотаційні визначення, а також мови програмування в цілому покладаються в значній мірі на рекурсію. Зазвичай використання мови програмування не піклується про логічні основи декларацій, але ми стверджуємо, що можна поставити серйозні питання, пов'язані з обґрунтованістю рекурсії.

На основі методів логічного виведення з логіки предиката, аксіоматична семантика є більш абстрактною, ніж денотаційна семантика, оскільки не існує поняття, що відповідає стану машини. Швидше, семантичне значення програми ґрунтується на твердженнях про відносини, які залишаються



однаковими щоразу, коли програма виконується. Співвідношення між початковим твердженням і кінцевим твердженням після фрагмента коду фіксує відсутність семантики коду. Інший фрагмент коду, який визначає алгоритм дещо по-іншому, але створює одне і те ж остаточне твердження, буде безперечно еквівалентним за умови, що будь-які початкові твердження є однаковими. Докази того, що твердження є істинними, не покладаються на будь-яку конкретну архітектуру базової машини; скоріше вони залежать від зв'язків між значеннями змінних. Хоча окремі значення змінних змінюються під час виконання програми, певні зв'язки між ними залишаються однаковими. Ці інваріантні зв'язки утворюють твердження, що виражають семантику програми.

Офіційні семантичні прийоми, які ми вивчали до цього часу, включають денотаційну семантику, математичні основи якої лежать в теорії рекурсивної функції, і аксіоматичну семантику, основи якої залежать від логіки предиката. У цій главі ми вивчаємо алгебраїчну семантику, інший формалізм для семантичної конкретизації, основи якої базуються на абстрактних алгебрах. Алгебраїчна семантика включає алгебраїчну специфікацію даних і мовних конструкцій. Основна ідея алгебраїчного підходу до семантики полягає в назві різних видів об'єктів і операцій над об'єктами та використанні алгебраїчних аксіом для опису їх характерних властивостей. Методика алгебраїчної семантики зазвичай використовується для визначення абстрактних типів даних (АДТ). Основний принцип у визначенні АДТ передбачає опис логічних властивостей об'єктів даних з точки зору властивостей операцій (деякі з яких можуть бути константами), які маніпулюють даними. Фактичне зображення об'єктів даних та реалізація операцій над даними не є частиною специфікації. Наприклад, уточнюйте абстрактний тип, значення якого є стеками, визначаючи властивості операцій, які виштовхують або виводять елементи зі стеків, уникаючи опису фізичного зображення об'єктів, які служать стеками. У цій главі ми вводимо основні ідеї алгебраїчних специфікацій (син-податку) та відповідних алгебр (семантики), які служать моделями специфікацій. Як ми побачимо, алгебраїчні характеристики поширюються від об'єктів низького рівня, таких як значення істинності з булевими операціями, через об'єкти високого рівня, такі як програми з операціями для перевірки типу та інтерпретації вихідного коду. Алгебраїчна семантика - це широке поле вивчення, і в цьому короткому огляді ми можемо лише запропонувати основні математичні основи. Деякі основні поняття, розроблені тут, будуть використані у наступній главі, коли ми вивчимо наш підсумковий підхід до семантики, семантики дії.

Формальні методи, про які йшлося в попередніх розділах, зокрема, детонаційна семантика та структурна оперативна семантика, широко використовуються для надання точних та однозначних визначень мов програмування. На відміну від неофіційних визначень, написаних англійською мовою чи якоюсь іншою природною мовою, формальні дефініційні методи можуть прислужувати основою для доведення властивостей мов програмування та коректності програм. Хоча більшість програмістів покладаються на неофіційну специфікацію мов, ці визначення часто розпливчасті, неповні та вічні. Англійська мова не піддається точним та однозначним визначенням. Незважаючи на аргументи, покладаючись на формальні специфікації мов програмування, програмісти, як правило, уникають їх під час навчання, намагаючись зрозуміти чи навіть реалізувати мову програмування. Вони вважають формальні визначення дефіцитно щільними, виразними, і на відміну від того, як вони бачать поведінку мов програмування. Крім того, формальні специфікації важко точно створити, змінити та розширити. Офіційні визначення великих мов програмування є переважними як для власника мови, так і для користувача мови, і тому залишаються здебільшого непрочитаними. Програмісти розуміють мови програмування з точки зору базових понять як управління потоком, прив'язки, модифікації зберігання та передачі параметрів. Офіційні специфікації часто затьмарюють ці поняття до того, що вкладник повинен вкласти чимало часу, щоб визначити, чи є властивим мові статичне чи динамічне масштабування, та як фактично передаються параметри. Семантика дій, яка намагається відповісти на цю критику формальних методів щодо мовної специфікації, була розроблена протягом останніх кількох років Петером Моссесом у співпраці з Девідом Уоттом. Метою їхніх зусиль було створення формальних семантичних специфікацій, які безпосередньо відображають надзвичайні обчислювальні концепції мов програмування, які легко читати та розуміти.

На основі проведеного аналізу існуючих мов програмування та математичних теорій, які покладені в основи цих мов, треба виділити три головні парадигми програмування: імперативне програмування, функціональне програмування, логічне програмування.

З кожною з цих парадигм пов'язані певні математичні теорії. Так в основу мови імперативної парадигми програмування можуть бути покладені наступні відомі формалізми: нормальні алгоритми Маркова, машина Поста, машина Т'юринга.

Базисним для функціональної парадигми є лямбда-числення Алонсо Чьорча. Мови логічної парадигми програмування можуть включати числення висловлювань, числення предикатів (логіку першого порядку), числення резолюцій, теорію доведення теорем.

Куб гібридизації парадигм програмування уявляє з себе наочну класифікацію восьми можливих гібридів. На рис.1. дається графічне зображення куба гібридизації.

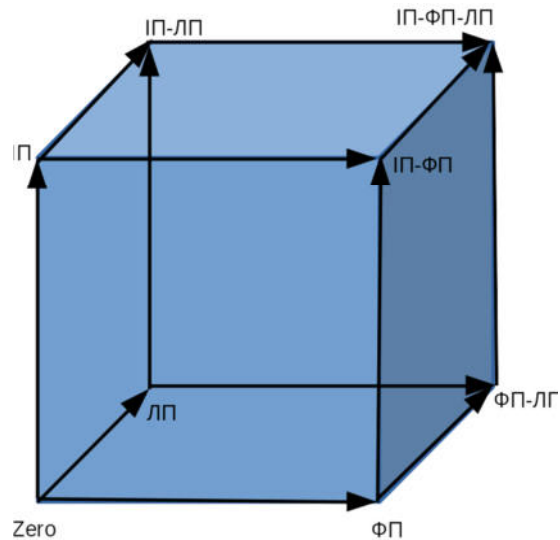


Рис.1. Куб гібридизації парадигм програмування

Основні позначення наступні:

□ - базова нуль-парадигма;

ІП – парадигма імперативне програмування;

ФП – парадигма функціонального програмування;

ЛП – парадигма логічного програмування;

ІП-ФП – гібрид імперативного та функціонального програмування;

ІП-ЛП – гібрид імперативного та логічного програмування;

ФП-ЛП – гібрид функціонального та логічного програмування;

ІП-ФП-ЛП – гібрид імперативного, функціонального та логічного програмування.

Формальна система (математична теорія)  $\mathcal{E}$  є четвіркою  $\langle T, P, A, R \rangle$ , де  $T$  – множина термів та операцій,  $P$  – правила побудови правильно побудованих формул (ППФ),  $A$  – система аксіом,  $R$  – множина правил виведення.

Будь-яку мову програмування з погляду семантики можна розглядати як сукупність функційних елементів (фелів), які можуть бути виражені в термінах формальної системи.

Тоді процес гібридизації можна розглядати як побудову гібридної формальної системи на основі двох окремих систем [12].

Під час операції гібридизації теорії можуть об'єднувати множини своїх функційних елементи, які в собі несуть різні семантики, або результат взаємодії функційних елементів з різних формальних систем, отримуючи гібридний функційний елемент.

Треба відзначити, що й формальні системи можуть мати в межах однієї парадигми розмаїття числень. Так розглянемо класифікацію лямбда-числень для функціональної парадигми програмування, яка отримала назву лямбда-куба [13,14].

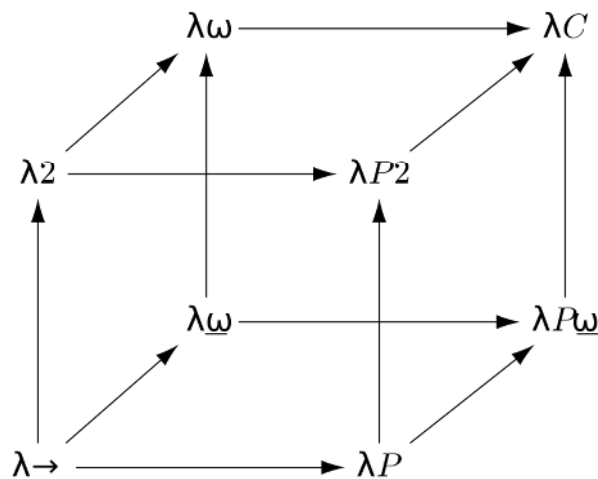


Рис.2. Лямбда-куб теорій функціонального програмування

Куб організований відповідно до можливих залежностей між типами і термами цього обчислення і формує природну структуру для обчислення конструкцій.

Три осі, що виходять з базової вершини, породжують такі системи:

- терми, що залежать від типів: система  $\lambda 2$  (лямбда-числення з поліморфними типами, система F);
- типи, які залежать від типів: система  $\lambda \omega$  (лямбда-числення з операторами над типами);
- типи, які залежать від термів: система  $\lambda P$  (лямбда-числення з залежними типами).

Решта системи являють собою різні комбінації перерахованих залежностей. Найбільш багата система  $\lambda P \omega$  (поліморфне лямбда-числення вищого порядку з залежними типами) фактично є обчисленням конструкцій.

Всі системи лямбда-куба мають властивість сильної нормалізації: будь-який допустимий терм (і тип) за кінцеву кількість  $\beta$ -редукцій приводиться до єдиної нормальної форми.

### Висновки

В роботі приведений аналіз існуючих систем опису семантики різноманітних парадигм програмування. Сформована класифікація взаємодії різних методів опису семантики мов програмування та побудований куб гібридизації основних парадигм програмування. Стисло приведені принципи гібридизації формальних систем і функційних елементів для подальшого конструювання programming language from scratch.

### Список використаної літератури

1. Баклан І. В., Баклан Я. І. Термінологічний підхід – шлях від метамови до систем інтелектуального перекладу. *Искусственный интеллект*, № 3, 2000. С. 412 – 420.
2. Martin Ward. Language Oriented Programming. — Computer Science Department, Science Labs, 1994.
3. Мартин Фаулер, Ребекка Парсонс. Предметно-ориентированные языки программирования. Издательство Вильямс, 2011. 576 с.
4. Сергей Дмитриев. Языково-ориентированное программирование: следующая парадигма. *RSDN Magazine*. — 2005.
5. Brauer, J., Crasemann, C., and Krasemann, H. Auf dem Weg zu idealen Programmierwerkzeugen - Bestandsaufnahme und Ausblick. *Informatik Spektrum*, 31(6):580-590. - 2008.
6. Peter D. Mosses. Semantics of programming languages: Using Asf+Sdf. *Science of Computer Programming*, Vol. 97, Part 1, 2015, pp. 2-10.
7. Robert Glück, Robin Kaarsgaard. A Categorical Foundation for Structured Reversible Flowchart Languages. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 336, 2018, pp. 155-171.
8. Kenneth Slonneger, Barry Kurtz. Formal Syntax and Semantics of Programming Languages: A Laboratory Based Approach. - Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1995.
9. David Watt, Programming Language Concepts and Paradigms, PrenticeHall International, Hemel Hempstead, UK, 1990.
10. David Watt, Programming Language Syntax and Semantics, Prentice Hall International, Hemel Hempstead, UK, 1991.
11. David Watt, Programming Language Processors, Prentice Hall International, Hemel Hempstead, UK, (1993).
12. Очеретяний О.К., Баклан І.В. Шляхи гібридизації мов програмування. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*: матеріали міжнар. наук. конф., с. Залізний Порт, 21-25 травня 2019 р. – Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2019. – С.135-136.
13. Barendregt, Henk. "Introduction to generalized type systems". *Journal of Functional Programming*. 1 (2): 125–154. (1991).
14. Lambda cube. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda\\_cube](https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_cube)

### References (transliterated)

1. Baklan I. V., Baklan Ya. I. Terminologichnyy pidxid – shlyax vid metamovy` do sy`stem intelektual`nogo perekladu. *Y`skusstvennyy y`ntellekt*, # 3, 2000. S. 412 – 420..
2. Martin Ward. Language Oriented Programming. — Computer Science Department, Science Labs, 1994.
3. Marty`n Fauler, Rebekka Parsons. Predmetno-ory`enty`rovannyye yazyky` programmy`rovany`ya. *Y`zdatel`stvo Vy`l`yams*, 2011. 576 s.
4. Sergej Dmy`try`ev. Yazykovo-ory`enty`rovannoe programmy`rovany`e: sleduyushhaya parady`gma. *RSDN Magazine*. — 2005.

5. Brauer, J., Crasemann, C., and Krasemann, H. Auf dem Weg zu idealen Programmierwerkzeugen - Bestandsaufnahme und Ausblick. *Informatik Spektrum*, 31(6):580-590. 2008.
6. Peter D. Mosses. Semantics of programming languages: Using Asf+Sdf. *Science of Computer Programming*, Vol. 97, Part 1, 2015, pp. 2-10.
7. Robert Glück, Robin Kaarsgaard. A Categorical Foundation for Structured Reversible Flowchart Languages. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 336, 2018, pp. 155-171.
8. Kenneth Slonneger, Barry Kurtz. Formal Syntax and Semantics of Programming Languages: A Laboratory Based Approach. - Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1995.
9. David Watt, Programming Language Concepts and Paradigms, PrenticeHall International, Hemel Hempstead, UK, 1990.
10. David Watt, Programming Language Syntax and Semantics, Prentice Hall International, Hemel Hempstead, UK, 1991.
11. David Watt, Programming Language Processors, Prentice Hall International, Hemel Hempstead, UK, (1993).
12. Ocheretyany`j O.K., Baklan I.V. Shlyaxy` gibry`dy`zacyi mov programuvannya. Intelektual`ni sy`stemy` pry`jnyattya rishen` i problemy` obchy`slyuval`nogo intelektu: materialy` mizhnar. nauk. konf., s. Zalizny`j Port, 21-25 travnya 2019 r. – Xerson: Vy`davny`cztvo FOP Vy`shemy`rs`ky`j V. S., 2019. – C.135-136.
13. Barendregt, Henk. "Introduction to generalized type systems". *Journal of Functional Programming*. 1 (2): 125–154. (1991).
14. Lambda cube. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda\\_cube](https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_cube)

УДК 550.34

Д.Б. ВЕНГРОВИЧ, І.В. БЄЛІНСЬКИЙ, В.А. ЛЕМЕШКО

Інститут геофізики ім.С.І. Субботіна НАН України

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ВІДОКРЕМЛЕНОЇ ХВИЛІ ЧЕРЕЗ ГРАНІТНУ ПЕРЕШКОДУ**

Було проведено експериментальне дослідження проходження відокремленої хвилі через гранітну переешкоду для побудови моделі проходження нелінійних хвиль в дискретних геофізичних середовищах. Було проведено два експерименти, в яких нелінійні солітоноподібні хвилі формувалися в ланцюгах сферичних гранул і проходили через переешкоди з гранітних блоків різної форми та маси. В першому експерименті в якості переешкоди використовувались гранітні блоки прямокутного перетину  $60 \times 70$  мм і довжини 31 мм, 71 мм та 499 мм. Відокремлена хвиля формувалась від ударного імпульса в ланцюгу 5 сталейних куль діаметром 41.25 мм. Всередині останньої, п'ятої кулі, був встановлений п'єзоелектричний кристал, який фіксував імпульс сили. Ця куля опиралась на гранітну переешкоду, на другому кінці якої було наклеєно акселерометр В&К 4384. Таким чином, в першому експерименті досліджувалось проходження відокремленої хвилі за допомогою двох датчиків: сили та прискорення. В другому експерименті досліджено проходження солітоноподібної хвилі через переешкоду, яка встановлювалась посередині ланцюга із 34 сталейних куль діаметром 41.25 мм, причому імпульси фіксувались двома датчиками сили, які були встановлені в ланцюгу до (на 8 позиції) та після переешкоди (на 26 позиції). В результаті цих експериментів доказано, що розповсюдження відокремленої хвилі залежить не лише від маси переешкоди, але й від форми. Крім того розповсюдження нелінійної хвилі в дискретному середовищі з переешкодами може бути досить точно описано моделлю розповсюдження солітона в ланцюгу гранул з внесенням в нього переешкоди з будь-якого (пружного) природного матеріалу.

Ключові слова: моделювання, солітон, гранітні переешкоди

Д.Б. ВЕНГРОВИЧ, И.В. БЕЛИНСКИЙ, В.А., ЛЕМЕШКО

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ГРАНИТНОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ**

Было проведено экспериментальное исследование прохождения уединенной волны через гранитное препятствие для построения модели распространения нелинейных волн в дискретных геофизических средах. Было проведено два эксперимента, где нелинейные солитоноподобные волны формировались в цепях сферических гранул и проходили через препятствия из гранитных блоков разной формы и массы. В первом, в качестве препятствия использовались гранитные блоки прямоугольного сечения  $60 \times 70$  мм и длиной 31 мм, 71 мм и 499 мм. Уединенная волна формировалась из ударного импульса в цепочке 5 стальных шаров диаметром 41.25 мм. Внутри последнего, пятого шара, установлен пьезоэлектрический кристалл, который отображал импульс силы. Этот шар упирался в гранитное препятствие, на другом конце которого был приклеен акселерометр В&К 4384. Таким образом, в первом эксперименте исследовалось прохождение уединенной волны через гранитное препятствие при помощи двух датчиков: силы и ускорения. Во втором эксперименте исследовано прохождение солитоноподобной волны через препятствие, которое устанавливалось посредине цепочки 34 стальных шаров диаметром 41.25 мм, причем импульсы фиксировались двумя датчиками силы, установленными в цепочке до (на 8 позиции) и после препятствия (на 26 позиции цепочки). В результате этих экспериментов доказано, что распространение уединенной волны зависит не только от массы препятствия, но и от его формы. Кроме этого распространение нелинейной волны в дискретной среде с препятствиями может быть очень точно описано моделью распространения солитона в цепочке гранул с внесением в нее препятствия из произвольного (упругого) природного материала.

Ключевые слова: моделирование, солитон, гранитное препятствие



D.B. VENGROVICH, I.V. BELINSKII, V.A. LEMESKO  
Institute of Geophysics (IGP) of the National Academy of Sciences of Ukraine

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF PASSING SOLITARY WAVE THROUGH GRANITE OBSTACLE

**The purpose of the article.** From the viewpoint of modern concepts of nonlinear geophysics, the presence of the hierarchical block structure, anisotropy and heterogeneities is the defining property of the natural medium in particular of the Earth's crust. The structure plays a key role in Earth's crust dynamic that is important for tectonic stress origin and localization as well as for next stress-relieved processes. We will simulate the propagation of nonlinear waves in the earth's crust taking into account the peculiarities of lithospheric internal structure, dynamical processes occurring on the level of structural element.

**The content of the work.** Experimental research of solitary wave passing through granite barrier for making the model of propagation nonlinear waves in discrete geophysical mediums was conducted. There were two experiments where nonlinear soliton-like waves were formed in the chains of spherical grains and passed through obstacles made by granite slugs of different shape and mass. In the first experiment the obstacles were granite blocks of rectangular cross-section  $60 \times 70$  mm and their length was 31 mm, 71 mm and 499 mm. A solitary wave was formed from impact momentum in the chain of five steel spheres with 41, 25 mm in diameter. Piezoelectric crystal was installed inside the last fifth sphere to reflect the impulse of force. This sphere thrust against granite obstacle on another end of which accelerometer B&K 4384 was glued. Thus the first experiment researched the passing of a solitary wave through granite obstacle with the help of two sensors: force and acceleration. The second experiment researched the passing of soliton-like wave through the obstacle which was placed in the middle of the chain of 34 steel spheres with 41, 25 mm in diameter and the impulses were registered by two force sensors installed in the chain before (on 8th position) and after the obstacle (on 26th position of the chain).

**Conclusions.** In the result of these two experiments it was proved that propagation of solitary wave depends not only on the mass of the obstacle but on its shape. Besides, the propagation of nonlinear waves in discrete mediums with the obstacles can be precisely described by the model of propagation of soliton in the chain of grains with introduction the barrier of arbitrary (elastic) natural material.

**Keywords:** modeling, soliton, granite barrier

## Постановка задачі

Інтерес геофізиків до відокремленої хвилі (ВХ) обумовлений не лише вивченням хвиль, які зароджуються при глобальних Земних процесах, але й вивченням таких Земних явищ, як землетрус, цунамі, тощо [2]. Явище ВХ вперше помітили в 19 столітті, та експериментально не могли отримати. Тому ВХ вивчали математики, вони й прийшли до висновку, що основними її ознаками є наступні: при поширенні ВХ не змінює своєї форми і амплітудно-частотних характеристик; ВХ поширюється з постійною швидкістю, яка залежить від величини амплітуди; при взаємодії з такою ж хвилею, ВХ поводить як частинка.

## Аналіз останніх досліджень та публікацій за темою

Вперше експериментально ВХ в несучільних середовищах була отримана в 1985 році [1]. Авторами в експерименті використовувалась кварцова трубка з внутрішнім діаметром 5 мм, в якій вертикально розташовувався ланцюг куль діаметром 4,75 мм із сталі ШХ-15. Ланцюг опирався на диск із загартованої сталі (HRC=40), сталі 30 ГСА товщиною 2 мм, що не торкався кварцової трубки. Під цим диском склеєна з ним епоксидною смолою розташовувалась таблетка із ЦТС-19, що служила п'єзoeлектричним перетворювачем сили, що діє на сталевий диск. Дана таблетка, в свою чергу, розташовувалась на латунному стрижні довжиною 200 мм, залитому епоксидною смолою і поміщеному в мідний корпус. Ця конструкція датчика сили дозволяє уникнути впливу відображених хвиль в стрижні, що спеціально перевірялось в окремих дослідках. Сигнал з п'єзoeлектричного перетворювача знімався за допомогою мідного електрода, напаяного на верхню частину таблетки із ЦТС-19, яка своєю нижньою частиною була припаяна до латунного стрижня. Калібрування виміральної схеми ( $RC=0,25$  с) проводилось ударом одиночної кулі з наступним співставленням вимірної симетричної залежності напруги від часу з розрахованою по закону Герца. Осцилограф С8-17, що використовувався в даних експериментах, працював в режимі внутрішнього запуску від робочого сигналу. В [2] детально описано основні етапи досліджень, пов'язаних з ВХ. Ми також, з кінця минулого століття, теоретично [4] та експериментально вивчали розповсюдження нелінійних хвиль, але ми розташовували ланцюг горизонтально, а для генерації початкового збурення використовували консоль

маятниково механізму [3]. На вільному кінці цієї консолі ми встановлювали кулю, а іноді і дві. Ці кулі були такими ж як і кулі ланцюга, а саме – сталеві кулі діаметром 41.25 мм і вагою близько 286,7 г. Таким чином, від кута відхилення консолі маятника (а цей кут визначався спеціальною шкалою) залежала швидкість підльоту ударяючої кулі, а звідти ми визначали силу удару. Для дослідження поширення хвилі в одновимірному ланцюжку куль був розроблений і успішно застосовувався датчик-куля, який являв собою елемент середовища зі встановленим усередині п'єзоелементом. Для цього сталева куля була розрізана по діаметру, причому ширина розрізу становила 30-40 мкм. У центральній частині діаметральної площини розрізаної кулі створювали порожнину діаметром 10.8 мм і глибиною 1мм. В цій порожнині розміщувався чутливий елемент з п'єзокераміки ЦТС-19 діаметром 9.8 мм і товщиною 1мм. Градування датчика-кулі здійснювалось шляхом порівняння його динамічних параметрів з аналогічними параметрами датчика прискорення, який щільно прилаштовувався до датчика-кулі під час імпульсного навантаження [5]. Крім того була розроблена спеціальна установка і відповідно методика за допомогою якої удалося вперше експериментально досліджувати взаємодію солітонів, вивчивши зув фаз при їх зустрічному зіткненні [5], а також вивчити сам механізм формування відокремленої хвилі. Було доведено, що для формування ВХ необхідне періодичне, пружне середовище. Крім розповсюдження ВХ в одновимірному ланцюгу, ми проводили дослідження, використовуючи і двовірну модель. В ролі елементів моделі використовувались ті самі сталеві кулі, але по різному скомбіновані. Досліджували ми ланцюги з дефектами [6], вивчали взаємодію ланцюгів з піском [7], тощо. Важливість досліджень цього напрямку обумовлена побудовою нової моделі динаміки геофізичних середовищ з точки зору їх дискретності та структурованості [9], де було встановлено факти виникнення та розповсюдження подібних нелінійних хвиль в земній корі, як сукупності блоків, що формують напружені ланцюги [10].

#### Формулювання мети дослідження

Продовжуючи дослідження в цьому напрямку, поставимо завдання вивчити процеси переходу такої специфічної нелінійної хвилі як солітоноподібна (ВХ, компактон) хвиля з середовища її формування, ланцюга сферичних куль, у суцільне середовище, зокрема в середовища, близькі до природних. Наприклад, метою досліджень може бути експериментальне вивчення поширення ВХ через гранітні перешкоди, а розповсюдження нелінійної хвилі в дискретному середовищі з перешкодами може бути досить точно описано моделлю розповсюдження солітона в ланцюгу гранул з внесенням в нього перешкоди [6] з будь-якого (пружного) природного матеріалу.

#### Викладення основного матеріалу досліджень

Було проведено 2 експерименти. Схему першого наведено на рис.1, а другого – на рис.2. Ланцюг із 5 сталевих куль діаметром 41.25мм був розміщений на спеціальній підставці так, аби остання, 5-та куля, спиралась на досліджуваний зразок. В цій кулі встановлений п'єзоелектричний кристал, як описано вище в [8], тобто ця куля була сенсором і одночасно елементом ланцюга. Збурення для формування нелінійної хвилі в ланцюгу куль передавалося ударом такої ж кулі, встановленої на консолі маятникового механізму, як це показано в [8]. Характеристика гранітних зразків наведена в таблиці №1.

Таблиця №1

| Щільність<br>$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Модуль Юнга<br>$E$ , Н/м <sup>2</sup> | Коефіцієнт<br>Пуассона | Швидкість пружних хвиль |                             |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|                                         |                                       |                        | у масиві<br>$C_L$ , м/с | у стрижні<br>$C_{cm}$ , м/с |
| 2700                                    | $7.02 \cdot 10^{10}$                  | 0.22                   | 5448                    | 5099                        |

Розміри гранітних зразків наведені в таблиці 2.

Таблиця №2.

| № п/п | № зразка | Довжина зразка, мм | Ширина зразка, мм | Глибина зразка, мм |
|-------|----------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1     | 1        | 71                 | 60                | 70                 |
| 2     | 2        | 30.3               | 60                | 70                 |
| 3     | 3        | 499                | 60                | 70                 |

## Серія експериментів 1

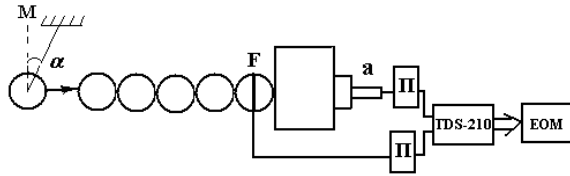


Рис.1. Схема експерименту. Символами позначено: М – маятник,  $\alpha$  – кут відхилення маятника, F – сенсор сили, а – акселерометр В&К#4384, П – узгоджуючі підсилювачі, TDS-210 – цифровий запам'ятовуючий осцилограф, EOM – комп'ютер

## Серія експериментів 2

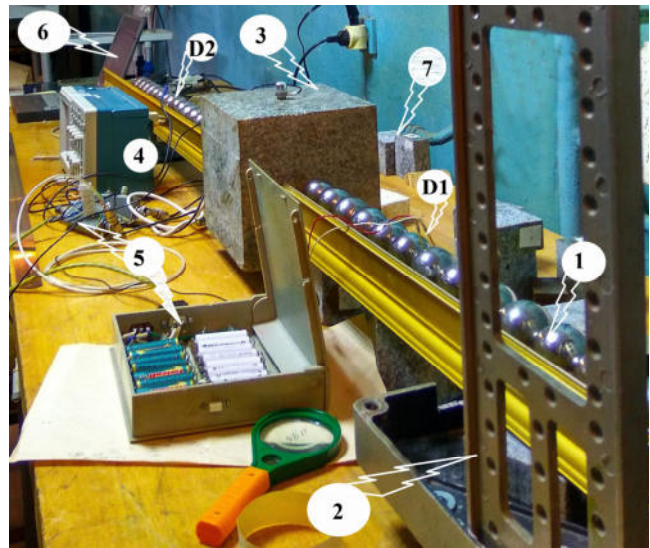
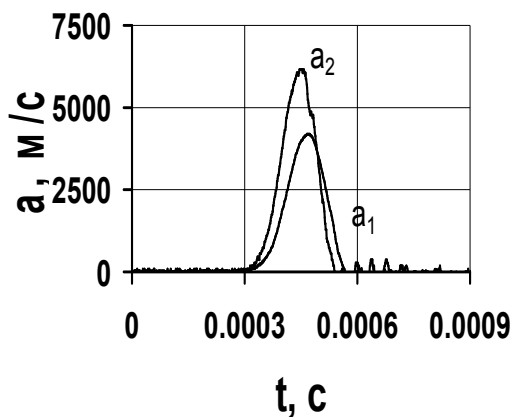


Рис. 2. Фото експериментальної установки для експ. №2 (для експ. №1 використовувалась половина цього ланцюга куль). Ланцюг куль (1) зі зразком (3) №3 – гранітним кубом. (7) – гранітні зразки різних розмірів, D1, D2 – кулі-давачі в ланцюгу, В лівому верхньому кутку видно осцилограф (4) TDS-210, підсилювачі (4) з блоком живлення (5) та ноутбук (6), праворуч – частина каркаса ударного механізму (2)

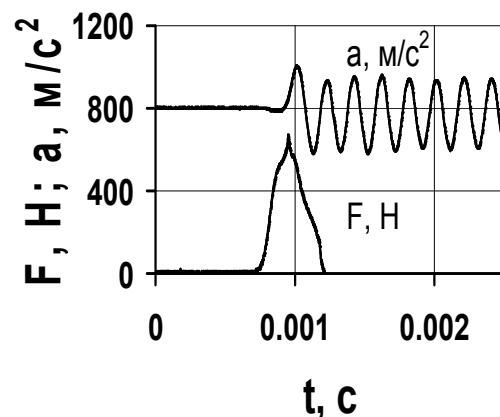
У попередніх експериментальних дослідженнях доведено, що в цьому ланцюгу після 4-го елемента формується ВХ. Тобто, ми з упевненістю стверджуємо, що на гранітний зразок поступає ВХ. З другого боку гранітного зразка приклеювали акселерометр В&К №4384, тобто в експерименті використовувалися два датчики: датчик-кулі в п'ятій позиції, яка контролює сформовану ВХ в ланцюгу і акселерометр В&К №4384, закріплений на торці гранітного зразка (див.рис.1).

Переходимо до серії експериментів 1. Виміряні величини (сила  $F$  і прискорення  $a$ ) з датчика-кулі та датчика В&К №4384 поступали на цифровий осцилограф TDS-210, а звідти – в персональний комп'ютер.

На рис.3 представлені осцилограми, отримані при використанні зразків довжиною 71 (1) і 30.3 мм (2) і осцилограма, отримана при використанні гранітного стержня довжиною 499 мм

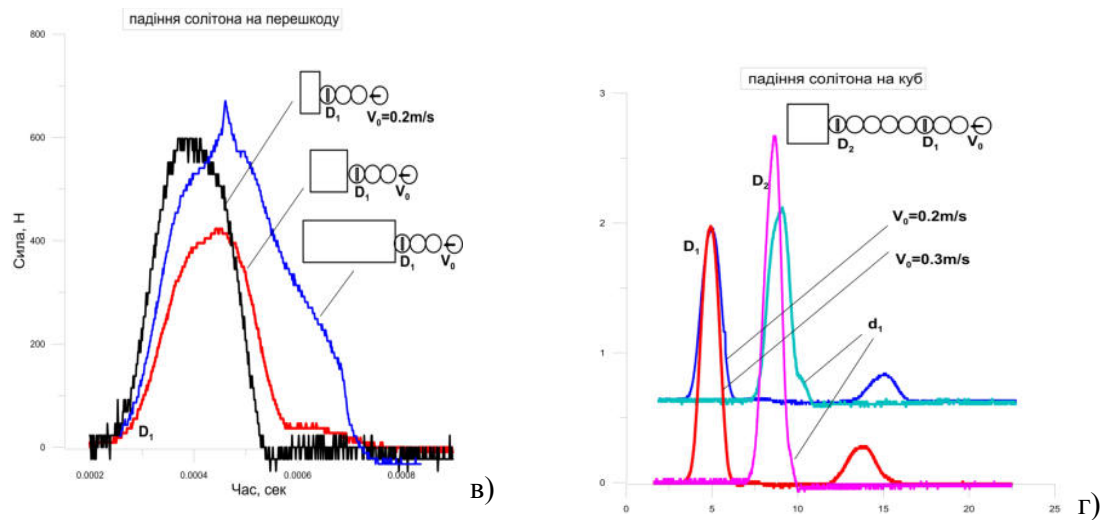


а)



б)

Рис.3. Імпульси прискорення  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a$ , зафіксовані акселерометрами на кубках а): №1 №2 і б) №3 відповідно

Рис. 4. в) співставлення форм імпульсів сили, г) давач  $D_1$  фіксує відбитий імпульс

Довжина ВХ, сформована в ланцюгу, дорівнює 4 елементам, тобто  $41,25 \times 4 = 165 \text{ мм}$ , значно більше довжини перших двох гранітних елементів і хвиля практично не спотворюється, її енергія передається гранітному елементу і штовхає його вперед. Спотворення форми імпульсу викликане невеликою відбитою хвилею (цей відбитий імпульс спостерігається при розміщенні додаткового давача на початку ланцюга – рис. 4г.). На рис.3 обидва куполоподібні сигнали приблизно однакової довжини і форми, тобто це одиничний імпульс тривалістю, близькою до тривалості падаючого імпульсу і затухаючими високочастотними коливаннями. У випадку із стрижнем довжина хвилі виявляється меншою від довжини стрижня і в ньому виникає хвильовий процес, тому на осцилограмі, яка зафіксована на рис.3б (зразок стрижня 499мм) наявність відбитої хвилі, накладеної на ту, що приходить, зафіксовано датчиком. В той же час на рис.3г акселерометр зафіксував синусоїдальні коливання гранітного стрижня з періодом порядку 200 мкс, це власні коливання стрижня.

Тобто експериментально зафіксована наступна картина: в разі коротких гранітних блоків падаюча ВХ спричиняє в основному його поступальний рух, а у випадку з довгим блоком ВХ поряд з цим викликає в ньому власні коливання. Це нагадує поведінку солітоноподібної хвилі в ланцюгу з дефектом, коли визначальною є маса дефектної кулі по відношенню до маси решти куль ланцюга [6]. Тому було вирішено провести аналогічне [6] дослідження, розмістивши всередині ланцюга куль замість дефектної кулі гранітні блоки різних форм та розмірів.

У другому експерименті також використовувались сталеві кулі діаметром 41.25 мм, ті ж сенсори-кулі, але ланцюг складався з 33 куль, при цьому після 14 куль в ланцюгу розміщувався дослідний зразок з граніту. Характеристики зразків, які були використані в експерименті №2 наведені в таблиці №3.

Таблиця №3

| №пп | № зразка        | Довжина зразка, мм | Ширина зразка, мм | Глибина зразка, мм | Вага, г |
|-----|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------|
| 1   | 1 «куб»         | 68.9               | 61                | 57                 | 726.8   |
| 2   | 2 «пів-куб»     | 70                 | 60.5              | 30.5               | 341.3   |
| 3   | 3 «великий куб» | 175                | 169               | 167                | 13040   |
| 4   | 4 «2/3пів-куба» | 70                 | 38                | 31                 | 211.9   |
| 5   | 5 «1/3пів-куба» | 70                 | 21                | 31                 | 121.1   |

Сенсори-кулі  $D_1$  і  $D_2$  розміщались на 8 та 26 позиціях ланцюга. Для ілюстрації на фото №1 показано ланцюг куль із зразком №3. Збурення забезпечується, як і в першому експерименті, ударом кулі діаметром 41.25мм, яка встановлена на консолі маятникового механізму. Результати представлені на рис.6-8.

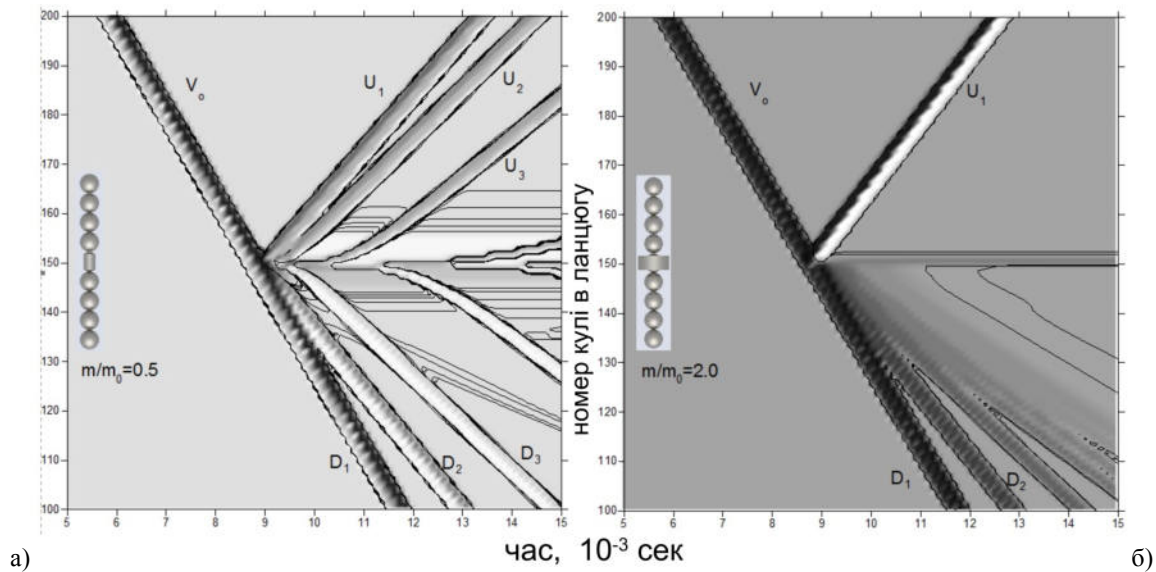


Рис.5. Для аналізу експериментальних даних наведено результати чисельного моделювання [6] розповсюдження солітоноподібної хвилі в нашому ланцюгу сталевих куль, через одну кулю меншої а) чи більшої б) в 2 рази маси. Ізолінії масової швидкості показують розсіяння хвилі (з лівого верхнього кута графіків) на дефекті в центрах графіків.

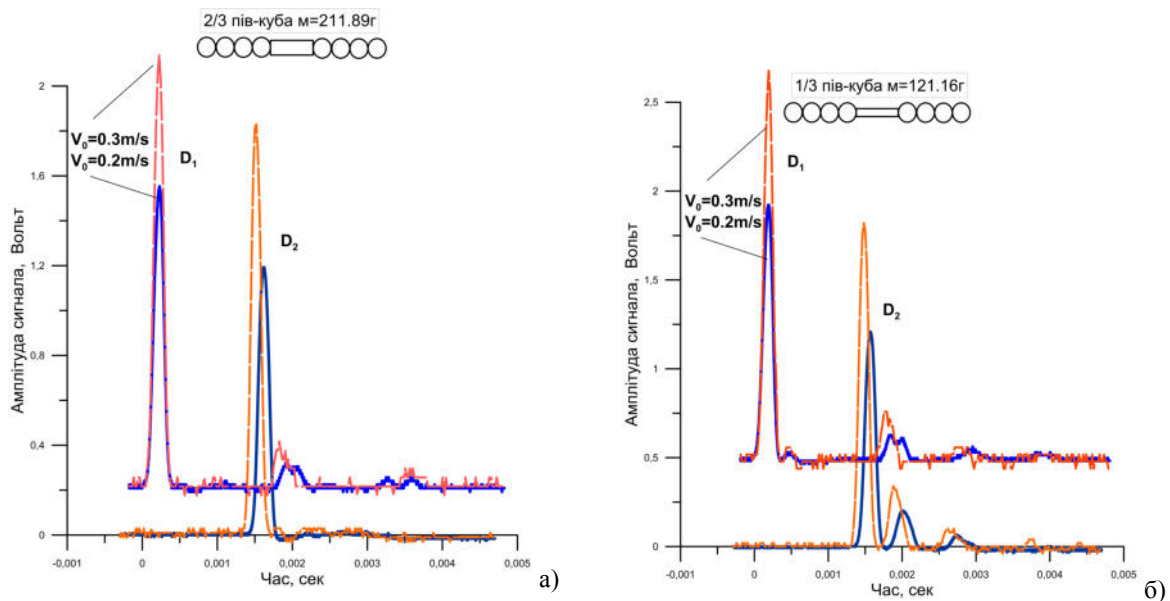


Рис.6. Осцилограми, отримані при використанні зразка №4 - ліворуч і зразка №5 праворуч. Швидкості ініціюючих ударів 0.2 та 0.3 м/с.

Оскільки маса гранітного елемента 4 близька до маси куль, рис.6а показує, що ВХ майже не спотворюється такою гранітною перешкодою. Маса гранітного елемента 5 менша маси кулі, рис.6б показує, що ВХ веде себе подібно до рис.5а – існують відбиті та розсіяні додаткові хвилі.



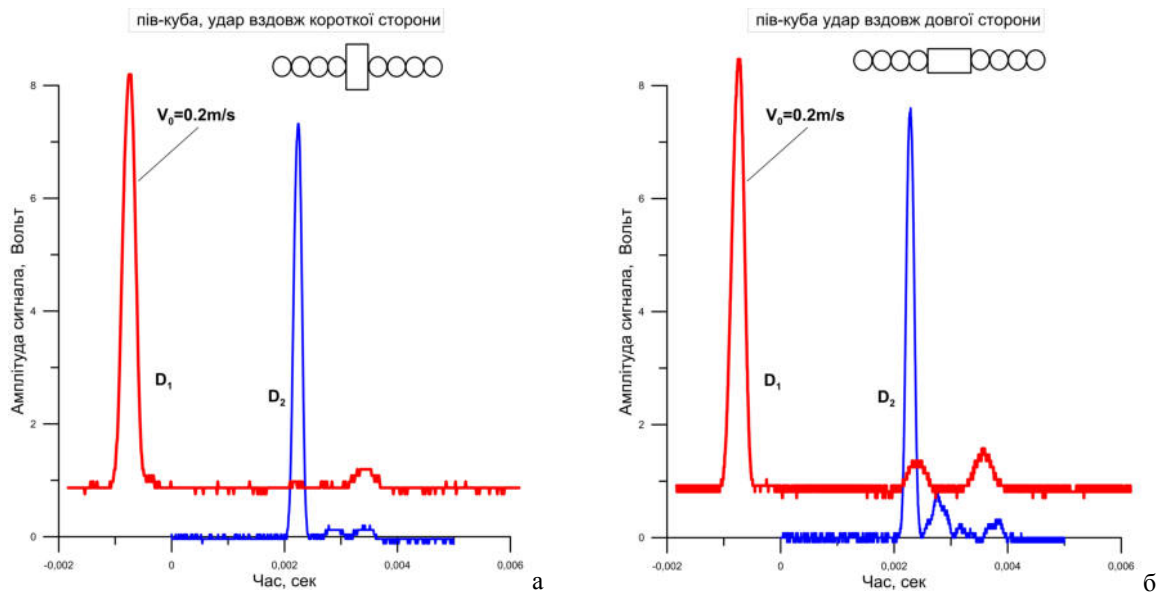


Рис.7. Осцилограми, отримані при використанні зразка №2. Ліворуч (а) – осцилограма, отримана коли зразок установлений в ланцюгу короткою стороною. Праворуч (б) – коли зразок встановлений довгою стороною.

Рис.7а показує вплив форми гранітної гранули. В даному випадку маса гранули близька до маси кулі (вона трохи більша і відповідає рис.5б). Незавжди помітити, що при установці зразка довгою стороною в ланцюгу другий сенсор, який встановлений на 26 позиції фіксує два імпульси. При установці цього ж зразка короткою стороною другий датчик фіксує лише один імпульс. Довга гранула, як і в першій серії експериментів, сильніше спотворює хвилю в ланцюгу.

На рис.8 представлені результати при використанні зразків, маси яких значно більші, ніж маса кулі, що ударає по ланцюгу (288г).

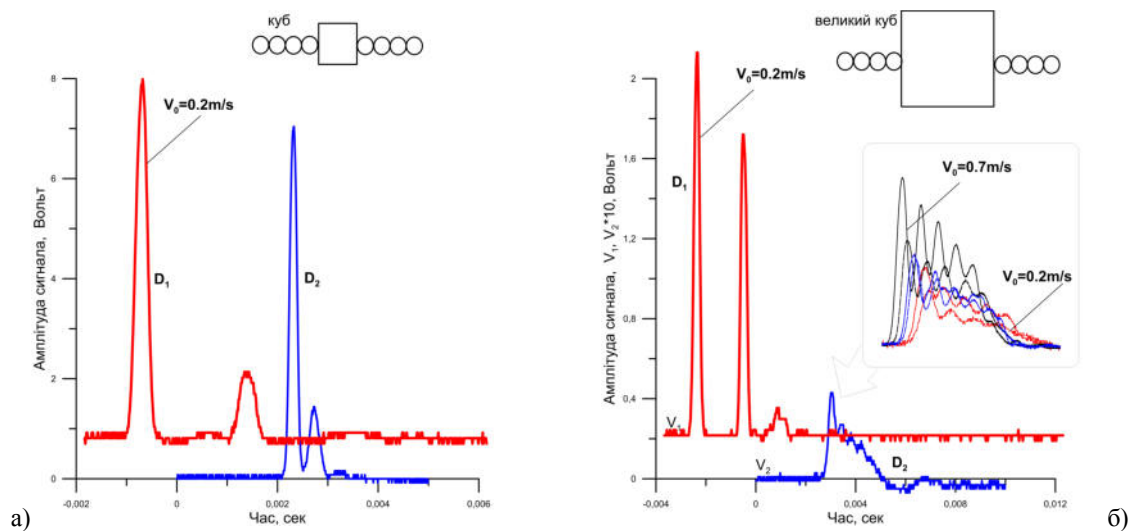


Рис.8. Осцилограми експериментів, в яких використовувались зразки №1 (а) та №3 (б). Для кращої деталізації імпульс 3, отриманий після зразка №3 (б) збільшено в 10 раз та додано його вид для швидкостей удару 0.2-0.7м/с.

На рис.8 (аналог рис.5б) чітко помітні відбиті імпульси (2-й для D1 а) і 2-й,3-й для D1 б)) від зразків більшої маси, які зафіксував сенсор №1. Крім того спостерігаються як на рис.5б хвилі D2, що пройшли через перешкоду. Зі збільшенням маси перешкоди збільшуються відбиті хвилі та зменшуються ті, що проходять через неї.

## Висновки

Експериментально доведено, що розповсюдження нелінійної хвилі в дискретному середовищі з перешкодами може бути дуже точно описано моделлю розповсюдження солітона в ланцюгу гранул з внесенням в нього перешкоди з довільного (пружного) природного матеріалу.

## Список літератури

1. Лазариди А.Н., Нестеренко В.Ф. Обнаружение уединенных волн нового типа в одномерной зернистой среде // Журн. прикладной механики и технической физики. – 1985. – №3. – С.115-118.
2. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. Москва “Наука”, 1990. – 288 с.
3. Даниленко В.А., Белінський І.В., Венгрович Д.Б. та інші. Особливості хвильових процесів у геофізичних середовищах при врахуванні їх структури // Доповіді НАН України. – 1996. – №12. – С.124-129.
4. Венгрович Д.Б. Исследование нелинейных процессов динамики структурированных сред : диссертация кандидата физ.-мат. наук : 04.00.22 – Киев, 1996, -245 с.
5. Белинский И.В., Гржибовский В.В., Лемешко В.А. Взаимодействие солитонов в цепочке стальных шаров // Физ. мезомех. 2010. -№3. Т.13. С.57-60.
6. Венгрович Д.Б. Взаимодействие солитона с неоднородностями дискретних сред / ДАН НАН Украины, 2005. – № 4. – С. 100-109.
7. Vengrovich D.B., Belinskii I.V., Lemesko V. A. Modelling of nonlinear waves propagation in the block structured Earth's lithosphere. 18th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, 2019 (in press), pdf № 16483.
8. Белинский И.В., Лемешко В.А. Экспериментальное исследование распространения возмущения в структурированной среде, составленной из гранитных блоков и стальных шаров// Импульсные процессы механики сплошных сред: Материалы X Межд.научн. конф. “Импульсные процессы в механике сплошных сред”. – Николаев: КП “Миколаївська обласна друкарня”, 2013.- С.198-201
9. Starostenko V.I., Danilenko V.A., Vengrovich D.B., Kutas R.I., Stovba S.M., Stephenson R., 2001. Modelling of the Evolution of Sedimentary Basins Including the Structure of the Natural Medium and Self-Organization Processes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, Vol. 37, No. 12, pp. 1004–1014.
10. D. B. Vengrovich. Tectonic and seismological settings of subduction. 16th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects 2017 DOI: 10.3997/2214-4609.201701858

## References (transliterated)

1. Lazaridi A.N., Nesterenko V.F. Obnaruzhenie uedinennykh voln novogo tipa v odnomernoy zernistoy srede // Zhurn. prikladnoy mehaniki i tehnicheckoy fiziki. – 1985. – #3. – S.115-118.
2. Filippov A.T. Mnogolikiy soliton. Moskva “Nauka”, 1990. – 288 s.
3. Danylenko V.A., Bielinskiy I.V., Venhrovych D.B. ta inshi. Osoblyvosti khvylovykh protsesiv u heofizychnykh seredovyschakh pry vrakhuvanni yikh struktury // Dopovidi NAN Ukrainy. – 1996. – №12. –S.124-129.
4. Vengrovich D.B. Issledovaniye nelineynykh protsessov dinamiki strukturirovannykh sred: dissertatsiya kandidata fiz.-mat. nauk : 04.00.22 – Kiyev. 1996. -245 s.
5. Belinskiy I.V., Grzhibovskiy V.V., Lemesko V.A. Vzaimodeystvie solitonov v tsepoche stalnykh sharov // Fiz. mezomeh. 2010. -#3. T.13. S.57-60.
6. Vengrovich D.B. Vzaimodeystvie solitona s neodnorodnostyami diskretnih sred / DAN NAN Ukrainy, 2005. – # 4. – С. 100-109.
7. Vengrovich D.B., Belinskii I.V., Lemesko V. A. Modelling of nonlinear waves propagation in the block structured Earth's lithosphere. 18th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, 2019 (in press), pdf № 16483.
8. Belinskiy I.V., Lemesko V.A. Eksperimentalnoe issledovanie rasprostraneniya vozmuscheniya v strukturirovannoy srede, sostavlennoy iz granitnykh blokov i stalnykh sharov// Impul'snyie protsessyi mehaniki sploshnykh sred: Mater. X Mezhd.nauchn. konf. “Impul'snyie protsessyi v mehanike sploshnykh sred”. – Nikolaev: KP “MikolaYivska oblasna drukarnya”, 2013.- S.198-201.
9. Starostenko V.I., Danilenko V.A., Vengrovich D.B., Kutas R.I., Stovba S.M., Stephenson R., 2001. Modelling of the Evolution of Sedimentary Basins Including the Structure of the Natural Medium and Self-Organization Processes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, Vol. 37, No. 12, pp. 1004–1014.
10. Vengrovich D.B. Tectonic and seismological settings of subduction. 16th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects 2017 DOI: 10.3997/2214-4609.201701858.

УДК 004.932.72'1

В. В. ГНАТУШЕНКО

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

В. В. ЖЕРНОВИЙ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### КОМПЛЕКСНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ НАБОРУ ДАНИХ З СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ НАДВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ ТРЕНУВАННЯ МЕРЕЖІ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ

Робота присвячена розробці комбінованого підходу до вирішення задачі сегментації на рівні об'єктів забудови на супутникових знімках надвисокої роздільної здатності WorldView-3, використовуючи сучасні технології глибокого навчання. Запропоноване рішення складається з комплексного алгоритму для підготовки тренувального датасету та налаштованої архітектури нейронної мережі на базі концепції зв'язного навчання. Алгоритм для підготовки датасету враховує складну структуру графічного продукту WorldView-3 та включає в себе комбінацію з *pan-sharpening*, технік тайлінгу (*image tiling*) та аугментації (*augmentation*) графічних даних. Алгоритм *pan-sharpening* використовується для збільшення інформативності супутникового знімка шляхом розширення мультиспектральних каналів зображення до роздільної здатності панхроматичного каналу. Підхід до тайлінгу адаптовано спеціально для роботи із супутниковими знімками надвисокої роздільної здатності за допомогою глибоких нейронних мереж. Ключовим елементом адаптованого алгоритму тайлінгу є уникнення занулень (*zero padding*) окремих частин тайлів для приведення їх до однакового розміру для всіх тайлів зображення. Аугментація датасету, отриманого за допомогою *pan-sharpening* та тайлінгу, використовується для збільшення мapi ознак при тренуванні глибокої мережі, що також дозволило покращити зазначені результати. Архітектура використаної у цьому дослідженні глибокої нейронної мережі базується на комбінації додатково налаштованих 'state-of-the-art' рішень для семантичної сегментації (*FuseNet*) та сегментації на рівні об'єктів (*Mask-RCNN*). Архітектура перероблена для роботи із графічними даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надвисокої роздільної здатності, зареєстрованими супутниковою системою WorldView-3. Використання нового підходу на зображеннях місцевості демонструє 5% покращення у порівнянні з прямим розпізнаванням об'єктів без попередньої обробки запропонованим алгоритмом.

Ключові слова: супутникові знімки, дистанційне зондування Землі, глибокі нейронні мережі, сегментація на рівні об'єктів.

В. В. ГНАТУШЕНКО

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

В. В. ЖЕРНОВОЙ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

### КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ НАБОРА ДАННЫХ ИЗ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ СЕТИ ГЛУБИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Робота посвящена разработке комбинированного подхода к решению задачи сегментации на уровне объектов застройки на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения WorldView-3, используя современные технологии глубокого обучения. Предложенное решение состоит из комплексного алгоритма для подготовки тренировочного датасета и настроенной архитектуры нейронной сети на базе концепции связного обучения. Алгоритм для подготовки датасета учитывает сложную структуру графического продукта WorldView-3 и включает в себя комбинацию из *pan-sharpening*, техник *image tiling* и аугментации графических данных. Алгоритм *pan-sharpening* используется для увеличения информативности спутникового снимка путем расширения мультиспектральных каналов изображения до разрешения панхроматического канала. Подход к тайлингу адаптирован специально для работы с спутниковыми снимками сверхвысокого разрешения посредством глубоких нейронных сетей. Ключевым элементом адаптированного алгоритма тайлинга является избежание зануления (*zero padding*) отдельных частей тайлов для приведения их к одинаковому размеру для всех тайлов изображения. Аугментация датасета, полученного с помощью *pan-sharpening* и тайлинга, используется для увеличения карты признаков при тренировке глубокой сети, что также позволило улучшить указанные результаты. Архитектура использованной в этом исследовании глубокой нейронной сети

базирується на комбинации дополнительно настроенных 'state-of-the-art' решений для семантической сегментации (FuseNet) и сегментации на уровне объектов (Mask-RCNN). Архитектура переработана для работы с графическими данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сверхвысокого разрешения, зарегистрированными спутниковой системой WorldView-3. Использование нового подхода на изображениях местности демонстрирует 5% улучшения по сравнению с прямым распознаванием объектов без предварительной обработки предложенным алгоритмом.

Ключевые слова: спутниковые снимки, дистанционное зондирование Земли, глубинные нейронные сети, сегментация на уровне объектов.

V. V. HNATUSHENKO

National Technical University Dnipro Polytechnic, Ukraine

V. V. ZHERNOVYI

Oles Honchar Dnipro national university

## MULTILEVEL SOLUTION FOR DATASET PREPARATION FROM THE VERY HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGERY FOR DEEP NEURAL NETWORK TRAINING

Current work is dedicated to development of complex solution to solve a problem of instance-level segmentation on WorldView-3 very high-resolution multispectral imagery using featured deep learning technologies. Such solution was a necessity due to scarcity of research on remote sensing image processing via featured deep learning technologies as well as absence of well-developed approaches and methods for very high-resolution satellite imagery preprocessing using image tiling in particular. Suggested solution consists of a complex approach for the dataset preparation and fine-tuned neural network architecture based on a concept of joint learning. Algorithm for dataset preparation considers complexity of WorldView-3 satellite imagery and involves a combination of such techniques as pan-sharpening, image tiling and dataset augmentation. The pan-sharpening algorithm is used to increase the initial amount of information in the satellite image by expanding the multispectral image channels to the panchromatic channel resolution. The approach to tiling has been adapted specifically for working with satellite images of very high-resolution using deep neural networks. The key element of the adapted tiling algorithm is the avoidance of zero paddings of individual parts of tiles to bring them to the same size for all image tiles. The augmentation of dataset obtained using pan-sharpening and tiling is used to increase the feature map when training a deep neural network, which also improved mentioned results. The architecture of neural network which is used in current research is based on a combination of fine-tuned state-of-the-art solutions in semantic segmentation (FuseNet) and instance segmentation (Mask-RCNN). Architecture is reworked to deal with very high-resolution remote sensing image data registered by WorldView-3 satellite system. Using suggested approach on urban area images demonstrated 5% improvement in object detection tasks in comparison to direct image processing without suggested algorithm.

Keywords: satellite imagery, remote sensing, image processing, deep neural networks, instance segmentation.

**Постановка проблеми.** Стрімким є розвиток космічних знімальних систем: вони дозволяють отримувати просторове розрізнення півметра і менше. Інформація, отримана методами дистанційного зондування з використанням аерокосмічних знімальних систем, є базою для створення цифрових моделей місцевості, моніторингу довкілля і природних ресурсів Землі. Невід'ємною частиною космічних досліджень є подальша складна фотограмметрична обробка отриманих зображень.

Із зростанням об'єму графічних даних ДЗЗ необхідність нових підходів до розпізнавання об'єктів є беззаперечною. Новий підхід повинен враховувати особливості графічних продуктів ДЗЗ та недостатність існуючих датасетів зображень поверхні Землі для застосування систем розпізнавання на сучасні комерційні супутники, WorldView-3 зокрема. Новий підхід до розробки та застосування алгоритмів для поліпшення результатів класифікації на мультиспектральних зображеннях Землі повинен використовувати потенціал високої просторової роздільної здатності даних та потужність систем глибокого навчання. Таке рішення необхідно в першу чергу через малу кількість рішень стосовно роботи з наборами даних ДЗЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, глибоке навчання (Deep Learning) є одним з найпопулярніших підходів до вирішення таких завдань, як класифікація зображень, виявлення об'єктів і 3D-реконструкція. Завдяки розвитку градієнтного зворотного поширення помилки і прискорених обчислень графічного процесора (GPU), Deep Learning став одним з найпопулярніших і найперспективніших підходів для семантичного картографування та інших завдань у сфері дистанційного зондування Землі. На відміну від класичних нейронних мереж, глибокі нейронні мережі (DNN від Deep Neural Network) регулюються за допомогою декількох прихованих шарів між вхідними та вихідними шарами. DNN може генерувати складні нелінійні взаємозв'язки між шарами і може бути складовою багатьох різних моделей іншої мережі. Кожна архітектура DNN зазвичай розроблена для



деяких конкретних даних. Це одна з головних причин того, чому глибокі нейронні мережі демонструють вражаючі результати у визначенні сотень різних об'єктів на різноманітних наборах даних і не здатні знайти будь-які об'єкти на даних дистанційного зондування. При розробці DNN для супутникових знімків не можливо покладатися на готові Deep Learning рішення без певних модифікацій. Необхідно змінити датасет або архітектуру DNN. Найпоширенішими проблемами, які виникають при навчанні DNN, є перенавчання і час обчислення. Перенавчання є загальною проблемою для моделей нейронних мереж, які не підходять для певного набору даних. Однак час обчислення або швидкість обчислення має найбільший вплив при обробці супутникових зображень через значний обсяг кожного окремого набору даних. Коли перенавчання не є проблемою, виникає інша – точність розпізнавання і її баланс зі швидкістю. Для того, щоб вирішити зазначену проблему, у DNN треба налаштувати багато параметрів, таких як розмір шарів, початкові ваги, швидкість навчання тощо.

Результати, продемонстровані багатьма популярними рішеннями у Deep Learning, такими як AlexNet, VGGNet, GoogleNet або навіть рішення на основі Mask R-CNN (рис. 1), мають одну загальну проблему — розмір вхідного зображення обмежений певним значенням. Наприклад, для вхідного шару VGGNet розмір встановлюється на  $224 \times 224 \times 3$  пікселів. Така роздільна здатність зображення вибирається з урахуванням механізму згортки і швидкодії системи. Такий розмір вхідного шару підходить для успішної обробки невеликих RGB-зображень, наприклад фрагментів карти, отриманих за допомогою Google Drive API ( $640 \times 640 \times 3$ ). Більшість реалізацій глибоких нейронних мереж реалізують модуль для зміни розміру зображення до формату, який підходить для вхідного шару мережі. Зміна розмірів супутникових знімків з надвисокою роздільною здатністю призводить до значних втрат інформації, оскільки багато об'єктів можуть займати кілька десятків пікселів. В цій ситуації, для оригінального розміру супутникових знімків майже неможливо розробити карту ознак, використовуючи глибоке навчання. При зміні розмірів супутникових знімків до ступенів VGGNet генерування карти ознак для класифікації можливий, але такий підхід неминуче призводить до значних втрат інформації. У цьому контексті, втрата інформації означає неможливість вилучення цінних ознак із супутникових знімків для вирішення завдань дешифрування об'єктів.

Особливістю мережі Mask R-CNN, що використана у цьому дослідженні, є мережа пропозицій регіонів (region proposal network, RPN) після останнього шару згортки. Говорячи в контексті супутникових зображень, такий розмір вхідного шару не підходить для широкого діапазону завдань обробки. Зміна розмірів супутникових знімків призведе до значної втрати інформації. Проблема стає більш значною, враховуючи просторову роздільну здатність супутникового знімку. Сучасні супутники забезпечують отримання зображень з просторовою роздільною здатністю 30 см на піксель. Враховуючи розмір вхідного шару згаданої вище VGGNet, просторова роздільна здатність зображення  $224 \times 224 \times 3$  може становити  $224 \times 0.3 \text{ м} = 67.2 \text{ м}$ , що практично не може відповідати багатьом випадкам регіонів для пошуку (наприклад, військова база, аеропорт, багато великих об'єктів міста тощо).

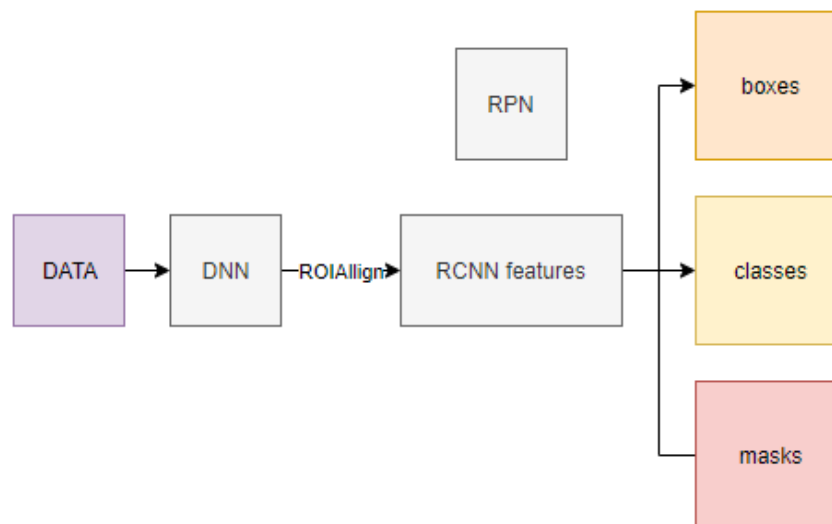


Рис. 1. Архітектура Mask RCNN

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка комплексного підходу до підготовки супутникових знімків надвисокої роздільної здатності WorldView-3 для подальшого розпізнавання об'єктів забудови з використанням сучасних рішень в області глибокого навчання. Підхід повинен враховувати структуру графічних продуктів WorldView-3 та малу кількість даних для тренування мережі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для того, щоб підійти до проблеми підготовки набору даних, досліджуються структури супутникової панхроматичної та мультиспектральної зйомок.



Як правило, супутникові дані складаються із зображень різних спектральних діапазонів різної роздільної здатності та додаткових матеріалів, які зазвичай називаються метаданими.

**Тайлінг.** Тайлінг зображень — це сімейство алгоритмів, націлених на розбиття зображення на тайли (tile), яке є занадто великим (часто понад 10 Гбайт) для певних завдань. Повністю автоматизована обробка таких обсягів даних поки залишається нездійсненою, але часткове рішення може включати пошук за допомогою комп'ютера об'єктів інтересу. Це дозволить зменшити обсяг даних для аналітиків, але залишається проблемою з точки зору швидкості обробки та робочої пам'яті [1].

У результаті дослідження в рамках статті було запропоновано розбиття на тайли без занулення (padding). Алгоритм розбиття зображень розроблений таким чином, щоб кожний тайл містив лише дані зображення. Для охоплення всієї області зображення алгоритм застосовується чотири рази, починаючи з кожного кута зображення (рис. 2). Такий підхід використовується в поєднанні з іншими техніками у запропонованому рішенні для поліпшення результатів побудови карти ознак з використанням глибинної нейронної мережі. Крім того, алгоритм зберігає координати кожного тайлу зображення на вихідному мультиспектральному зображенні, які використовуються пізніше як «анкери» для білінійної інтерполяції.

**Аугментація.** Ще одним підходом до попередньої обробки даних дистанційного зондування Землі є аугментація. Аугментація сприяє збільшенню кількості початкових даних з метою покращення процесу тренування глибинної нейронної мережі. Аугментація супутникових зображень може бути досягнута шляхом застосування різноманітних алгоритмів сегментації, а також афінних перетворень початкового зображення.

Датчики WorldView-3 отримують дані широкого діапазону різних довжин хвиль: панхроматичні, мультиспектральні, короткохвильові інфрачервоні (SWIR) та ін. У запропонованому рішенні використовуються властивості мультиспектральних даних супутника WorldView-3. Для підвищення роздільної здатності початкового 8-смугового мультиспектрального зображення спочатку використовується алгоритм паншарпенінгу (pan-sharpening) [2]. Чотири різних комбінації смуг зображення WorldView-3 використовуються як початкова точка дослідження (рис. 3, зліва направо): True Color (RGB), інфрачервоний False Color (FCI), покращений інфрачервоний False Color (EFCI) і батиметрія (Bathymetry).

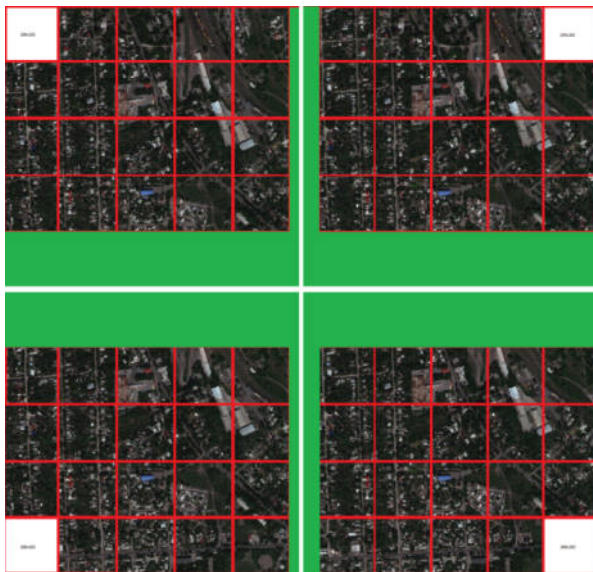


Рис. 2. Візуальне представлення роботи запропонованого алгоритму тайлінгу

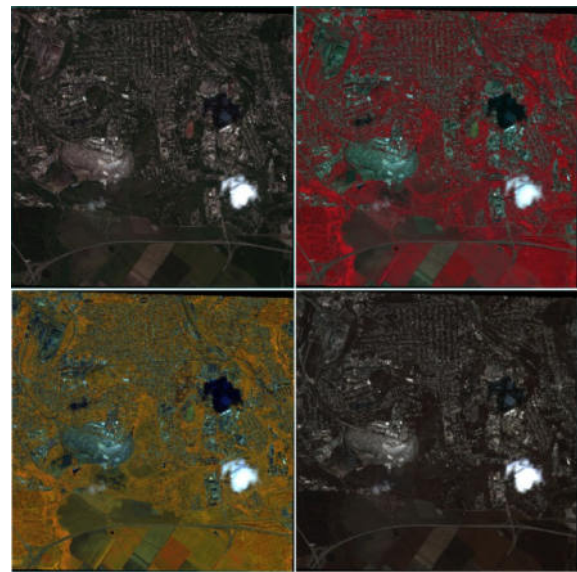


Рис. 3. Використані комбінації смуг WorldView-3

**Експеримент та результати.** У мережі можна знайти багато датасетів із супутникових зображень [3]. Проте, низка проведених нами експериментів показала, що для того, щоб виявити об'єкти на зображеннях з високою роздільною здатністю супутника WorldView-3, треба навчити глибинну нейронну мережу на зображеннях, створених саме датчиками WorldView-3. Таким чином, розробка підходу для створення нового датасету є необхідністю. Для тестування запропонованого підходу було підготовлено початковий датасет з чотирьох зображень спостереження Землі з супутника WorldView-3. Він доповнюється за допомогою декількох комбінацій смуг, наведених на рис. 3, таким чином, що початкове число зображень початкового розміру дорівнює 20. Згадані смуги успішно використовуються для розрахунку нормованих метрик, таких як нормалізований диференційний індекс вегетації (NDVI) або нормований диференційний водний індекс (NDWI) [4], [5] та багатьох інших індексів, розроблених під індивідуальні задачі [6]. Беручи до уваги дефіцит початкових зображень для розробки датасету, а також

потенційну корисність зазначених смуг супутникового зображення для вилучення додаткової інформації у вигляді нормалізованих диференційних індексів, вони обираються як початковий крок для аугментації датасету. Далі датасет додатково розширюється за допомогою розробленого алгоритму розбиття зображення на тайли так, що кінцевий розмір датасету перевищує 10000 екземплярів. В приведеному випадку розмір одного тайлу становив 300x300 пікселів, а розмір початкового зображення – 8192x8192 пікселів.

Для розробки архітектури глибокої нейронної мережі розглядалися рішення, які б могли використовувати переваги розробленого алгоритму тайлінгу та аугментації зображень. До основних архітектур глибоких нейронних мереж для обробки даних дистанційного зондування Землі, що розглядалися в рамках роботи, належать: подвійні мережі, стохастичні мережі, мережі спільного навчання [7]. Їх основна властивість – це використання декількох мереж в рамках однієї задачі. Це надає змогу обробляти модифіковані дані паралельно і не впливати на точність розпізнавання конкретної мережі, що була натренована на даних певного типу. Врешті решт був обраний підхід спільного навчання мереж. Такий тип навчання дозволяє виконувати навчання без вчителя однієї глибокої моделі нейронної мережі для вивчення псевдо-класів для супутникових зображень з надвисокою роздільною здатністю та використання їх для оновлення другої моделі. Через такі оновлення в рамках підходу, псевдокласи однієї мережі виявляються досить близькими до чітко визначеної класифікації іншої мережі, що робить реальні класи і особливості всієї архітектури більш конкретними [8].

Остаточна архітектура глибокої нейронної мережі включає в себе класифікатор на базі Mask RCNN, який ініціалізовано за допомогою екстрактора ознак ResNet-152 [9] в якості шару пропозицій регіонів для мережі, попередньо навченого на наборі даних ImageNet [10]. Однією з головних особливостей такої нейронної мережі згортки є об'єднані шари згортки з короткими зв'язками, які дозволяють працювати як з загальними особливостями зображення, так і з локальними властивостями (регіонами). Класифікатор Mask RCNN був модифікований для використання попередньо замороженого вихідного шару FuseNet [11], який являє собою інший класифікатор з декодованими сегментованими зображеннями, що надає змогу використання переваг спільного підходу до навчання. FuseNet заснований на конструкції нейромережі, що зветься автокодер, і дозволяє масштабувати рішення для різних розмірів вхідних даних і виконувати сегментацію на основі функцій, створених за допомогою операції розблокування (upsampling). Декодер FuseNet, поряд з операцією upsampling, виконує відновлення сегментованого зображення до його початкової просторової роздільної здатності. В рамках дослідження, FuseNet натреновано на новому датасеті від Microsoft під назвою Computer generated building footprints for Canada [12]. Це сет з трьох мільйонів зображень, які в основному включають міські райони Канади. Крім того, запропонована архітектура модифікована таким чином, щоб використовувати в оригінальному рішенні графічні зображення з розробленого датасету, а не випадкові екземпляри, «витягнуті» із зображень високого розрізнення. Інші типи аугментації (наприклад, з випадковим обертанням і перевертанням екземплярів зображення) не використовуються в пропонуваному підході для визначення точності підходу. Загальною рисою згаданої архітектури є здатність об'єднувати кілька джерел на різних етапах обчислення в шарах глибокої нейронної мережі (рис. 4).

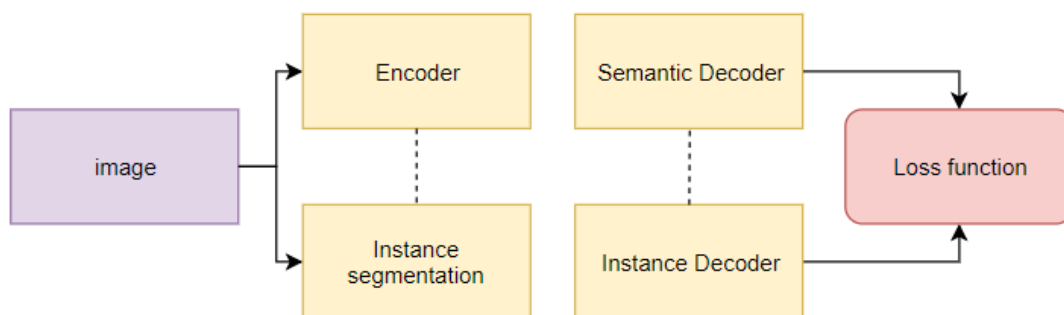


Рис. 4. Застосування принципу зв'язного навчання у пропонуваному підході

Таблиця 1 демонструє результати сегментації на рівні об'єктів на одному зображенні з розробленого датасету у порівнянні з традиційним алгоритмом тайлінгу. Колонка «Датасет» представляє комбінації зразків розширених даних, які обираються як вхідні дані для кожного потоку мережі. КТ – класичний тайлінг (із зануленням), ЗП – запропонований підхід. TP (true positive), FP (false positive), FN (false negative) є істинними позитивними знаходженнями (об'єкт інтересу є на зображенні і правильно виявлений), помилковими позитивними знаходженнями (об'єкт інтересу відсутній на зображенні, але виявлений) і помилково негативні знаходження (об'єкт присутній, але не виявлено) відповідно. Повнота обчислюється у відсотках від істинних позитивних виявлень до загальної кількості об'єктів. Коректність обчислюється як відсоток справжніх позитивних виявлень для всіх виявлень. Якість розраховується у

відсотках від справжніх позитивних виявлень до суми всіх позитивних виявлень та помилкових негативних виявлень.

Таблиця 1. Результати виявлення об'єктів на одному випадковому зображенні з розробленого датасету

| Датасет                    | TP  | FP | FN | Повнота | Коректність | Якість |
|----------------------------|-----|----|----|---------|-------------|--------|
| КТ+Binarization            | 138 | 12 | 19 | 0.89    | 0.92        | 0.76   |
| ЗП+RGB                     | 143 | 9  | 14 | 0.91    | 0.94        | 0.82   |
| ЗП+RGB+FCI                 | 141 | 10 | 16 | 0.90    | 0.94        | 0.80   |
| ЗП+RGB+FCI+EFCI+Bathymetry | 137 | 7  | 20 | 0.87    | 0.96        | 0.75   |

Низка експериментів показала, що певний вхідний набір зображень з датасету може впливати на ефективність роботи системи комп'ютерного зору. Для порівняння результатів було обрано датасети, попередньо оброблені існуючими алгоритмами і доповнені зразками, до яких було попередньо застосовано алгоритм бінаризації з порогом 0.5. Пропонований алгоритм тайлінгу, застосований до даних RGB без додаткової аугментації, демонструє покращення результатів виявлення об'єктів. Додаткова аугментація з використанням False Color зразків з тайлів пропонованим методом не показує жодних поліпшень у виявленні з використанням використаної архітектури нейронної мережі. Подальша аугментація всіх методів попередньої обробки зображення, описаних вище, не покращує кількість позитивних детекцій, але покращує правильність цих результатів до 96%. Враховуючи повноту та коректність виявлення в однаковій мірі важливими, датасет із застосуванням пропонованого підходу без будь-якої аугментації забезпечує більш якісні результати у порівнянні з тайлами розробленого датасету з додатковою аугментацією та тайлами датасету, де застосовувалось занулення.

**Висновки.** У роботі запропоновано комплексний підхід до роботи з мультиспектральними даними надвисокої роздільної здатності. Розроблене рішення використовує низку алгоритмів, які базуються на підходах тайлінгу та аугментації зображень, властивостях супутникових зображень надвисокої роздільної здатності, підходах глибинної нейромережевої обробки на основі згортки та пропозицій регіонів для сегментації зображень на рівні окремих об'єктів. Методика тайлінгу зображень забезпечує швидкий і гнучкий спосіб підготовки датасету для обробки зображень за допомогою мереж глибинного навчання з попередньо підготовленими екстракторами ознак. Нами розроблено новий алгоритм розбиття зображень, що враховує структуру супутникових мультиспектральних зображень.

Описаний підхід до розробки даних демонструє поліпшення якості сегментації на 6%, що є помітним поліпшенням, враховуючи кількість об'єктів на сучасних супутникових знімках надвисокої роздільної здатності.

Запропонований алгоритм тайлінгу має можливості для подальшого вдосконалення. Можна модифікувати алгоритм тайлінгу таким чином, щоб використовувати переваги різних алгоритмів сегментації. На наступному етапі дослідження для аугментації даних дистанційного зондування Землі буде використовуватись підхід попередньої сегментації. Інші алгоритми сегментації можуть також забезпечити ще кращі результати в залежності від алгоритму злиття сусідніх тайлів.

#### Список використаної літератури.

- [1] Wassenberg J. Efficient Algorithms for Large-Scale Image Analysis: Schriftenreihe automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, KIT Scientific, 2011.
- [2] Hnatushenko V.V., Vasyliov V.V. Remote sensing image fusion using ICA and optimized wavelet transform: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences Volume XLI-B7, 2016, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 2016. Pp. 653-659.
- [3] Awesome Satellite Imagery Datasets. URL: <https://github.com/chrieke/awesome-satellite-imagery-datasets> (last accessed 2019/3/10).
- [4] Szabó, Szilárd, Gacsi Z., Boglárka B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories: Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment 10.3-4, 2016. Pp. 194-202.
- [5] Longbotham, Nathan, et al. Prelaunch assessment of worldview-3 information content: 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), IEEE, 2014.
- [6] Samsudin, Hanim S., Shafri ZM H., and Hamedianfar A. Development of spectral indices for roofing material condition status detection using field spectroscopy and WorldView-3 data: Journal of Applied Remote Sensing 10.2, 2016.
- [7] Han J., Zhang D., Cheng G., Guo L., Ren J. Object detection in optical remote sensing images based on weakly supervised learning and high-level feature learning: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(6), 2015. Pp. 3325-3337.
- [8] Lu X., Yuan Y., Zheng X. Joint dictionary learning for multispectral change detection: IEEE transactions on cybernetics, 47(4), 2017. Pp. 884-897.

- [9] He, Kaiming, et al. Deep residual learning for image recognition: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
- [10] Deng, Jia, et al Imagenet: A large-scale hierarchical image database: 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Ieee, 2009.
- [11] Hazirbas, Caner, et al Fusetnet: Incorporating depth into semantic segmentation via fusion-based cnn architecture: Asian conference on computer vision, Springer, Cham, 2016.
- [12] Microsoft Computer Generated Building Footprints for Canada. URL: <https://github.com/Microsoft/CanadianBuildingFootprints> (last accessed 2019/3/8).
- [13] Lu X., Yuan Y., Zheng X. Joint dictionary learning for multispectral change detection: IEEE transactions on cybernetics, 47(4), 2017. Pp. 884-897.
- [14] Hnatushenko V.V., Kashtan V.J., Shedlovska Y.I. Processing technology of multi-spectral remote sensing images: IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017, Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 355-358.
- [15] Audebert N., Bertrand Le Saux, Sébastien Lefèvre Deep learning for remote sensing – An introduction: ONERA, IRISA, Université Bretagne Sud, Atelier DLT Sageo, 2018.

### References.

- [1] Wassenberg J. Efficient Algorithms for Large-Scale Image Analysis: Schriftenreihe automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, KIT Scientific, 2011.
- [2] Hnatushenko V.V., Vasyliov V.V. Remote sensing image fusion using ICA and optimized wavelet transform: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences Volume XLI-B7, 2016, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 2016. Pp. 653-659.
- [3] Awesome Satellite Imagery Datasets. URL: <https://github.com/chrieke/awesome-satellite-imagery-datasets> (last accessed 2019/3/10).
- [4] Szabó, Szilárd, Gacsi Z., Boglárka B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories: Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment 10.3-4, 2016. Pp. 194-202.
- [5] Longbotham, Nathan, et al. Prelaunch assessment of worldview-3 information content: 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), IEEE, 2014.
- [6] Samsudin, Hanim S., Shafri ZM H., and Hamedianfar A. Development of spectral indices for roofing material condition status detection using field spectroscopy and WorldView-3 data: Journal of Applied Remote Sensing 10.2, 2016.
- [7] Han J., Zhang D., Cheng G., Guo L., Ren J. Object detection in optical remote sensing images based on weakly supervised learning and high-level feature learning: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(6), 2015. Pp. 3325-3337.
- [8] Lu X., Yuan Y., Zheng X. Joint dictionary learning for multispectral change detection: IEEE transactions on cybernetics, 47(4), 2017. Pp. 884-897.
- [9] He, Kaiming, et al. Deep residual learning for image recognition: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016.
- [10] Deng, Jia, et al Imagenet: A large-scale hierarchical image database: 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Ieee, 2009.
- [11] Hazirbas, Caner, et al Fusetnet: Incorporating depth into semantic segmentation via fusion-based cnn architecture: Asian conference on computer vision, Springer, Cham, 2016.
- [12] Microsoft Computer Generated Building Footprints for Canada. URL: <https://github.com/Microsoft/CanadianBuildingFootprints> (last accessed 2019/3/8).
- [13] Lu X., Yuan Y., Zheng X. Joint dictionary learning for multispectral change detection: IEEE transactions on cybernetics, 47(4), 2017. Pp. 884-897.
- [14] Hnatushenko V.V., Kashtan V.J., Shedlovska Y.I. Processing technology of multi-spectral remote sensing images: IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017, Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 355-358.
- [15] Audebert N., Bertrand Le Saux, Sébastien Lefèvre Deep learning for remote sensing – An introduction: ONERA, IRISA, Université Bretagne Sud, Atelier DLT Sageo, 2018.



УДК 004.92:519.6:543.4

П.Й. ГУЧЕК<sup>1,2</sup>  
О.М. ДУДЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Інститут біокибернетики і біомедицинської інженерії ім. Налеча Польської академії наук, Польща  
<sup>2</sup>Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

### ОДИН З ПІДХОДІВ АНАЛІЗУ ЧАСУ ПОЛЬОТУ ФОТОНІВ З МЕТОЮ УСУНЕННЯ ВПЛИВУ НЕДОСКОНАЛОСТІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

Використання оптичних методів при проведенні вимірювань на голові дорослого людини часто стикається з труднощами інтерпретації. Якість вимірювальної системи безпосередньо впливає на якість отриманих результатів досліджень. Частою причиною поганої якості даних вимірювань є велика дисперсія результатів вимірювань. Звичайно причиною цього є відсутність опору вимірювальної системи до змін, що відбуваються в її середовищі. В роботі розглянуто один з підходів до аналізу часу польоту фотонів з метою усунення впливу недосконалості системи вимірювання, що дає змогу коригувати виявлені артефакти в отримуваному сигналі.

Ключові слова: інформаційні технології, ближня інфрачервона спектроскопія, комп'ютерна візуалізація, медична діагностика.

П.И. ГУЧЕК<sup>1,2</sup>  
О.Н. ДУДЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт биокбернетики и биомедицинской инженерии им. Налеча Польской академии наук, Польша  
<sup>2</sup>Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова

### ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ АНАЛИЗА ВРЕМЕНИ ПОЛЕТА ФОТОНОВ С ЦЕЛЮ УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСОВЕРШЕНСТВА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Использование оптических методов при проведении измерений на голове взрослого человека часто сталкивается с трудностями интерпретации. Качество измерительной системы напрямую влияет на качество полученных результатов исследований. Частой причиной плохого качества данных измерений является большая дисперсия результатов измерений. Конечно, причиной этого является отсутствие сопротивления измерительной системы к изменениям, происходящим в ее среде. В работе рассмотрен один из подходов к анализу времени полета фотонов с целью устранения влияния несовершенства системы измерения, что позволяет корректировать выявленные артефакты в получаемом сигнале.

Ключевые слова: информационные технологии, ближняя инфракрасная спектроскопия, компьютерная визуализация, медицинская диагностика.

P.I. GUCHEK<sup>1,2</sup>  
O.N. DUDCHENKO<sup>2</sup><sup>1</sup>Nalecz Institute of Biocybernetics and Biomedical Engineering, Poland  
<sup>2</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson branch

### ONE OF THE APPROACHES TO THE ANALYSIS OF THE FLIGHT TIME OF PHOTONS IN ORDER TO ELIMINATE THE INFLUENCE OF THE IMPERFECTION OF THE MEASUREMENT SYSTEM

One of the modern approaches to the diagnosis of various types of diseases in medical practice is the use of high-density diffuse optical tomography devices. The use of optical methods in conducting measurements on an adult's head often encounters the difficulty of interpretation. The light emitted deep into the tissue under investigation must pass through the tissues surrounding the brain (skin, skull bones, brain membranes) before it reaches its goal. Therefore, the measured signal is influenced not only by the oxygenation of the brain tissue itself, but also by changes in oxygenation and blood supply to extracerebral tissues. The quality of the measuring system directly affects the quality of the research results obtained, and hence the quality of the analyzes carried out on the basis of these data. Frequent cause of poor quality of measurement data is a large variance of measurement results. Usually the reason for this is the lack of resistance of the measuring system to the changes occurring in its environment. The greater the environmental impact of the measurement result, the less useful are the data collected in this way. In order to verify the results obtained by the optical method, and to eliminate the influence of the imperfections of the measuring system, it is necessary to seek new methods and approaches. One of the approaches to analyzing the flight time of photons is considered in order to eliminate the influence of the imperfection of the measurement system, which makes it possible to correct the detected artifacts in the received signal and carry out further analysis of the results of the measurement. Monitoring with time-separating of flight of photons of dye and purification of dye ICG (indocyanine green) allows to effectively evaluating blood supply to the cerebral cortex. The optical measuring system used in the tests was tested in-vivo in both signal analysis modes, both in diffuse reflection and in the measurement of ICG fluorescence, performed



*in a group of healthy people and in patients with inflammation of the brain. The new method well corrects the zero statistical moment - the total number of photons for fluorescence channels, especially when the signals are very heterogeneous due to hardware problems.*

*Keywords: information technology, near-infrared spectroscopy, computer visualization, medical diagnostics.*

### **Постановка проблеми**

Якість виміральної системи безпосередньо впливає на якість отриманих результатів досліджень, а отже, і на якість аналізів, які здійснюються на основі цих даних. Частою причиною поганої якості даних вимірювань є велика дисперсія результатів вимірювань. Звичайно причиною цього є відсутність опору виміральної системи до змін, що відбуваються в її середовищі. Чим більше вплив умов навколишнього середовища на результат вимірювання, тим менш корисні дані, які зібрані таким чином. З метою перевірки результатів, отриманих оптичним методом, та усунення впливу недосконалостей виміральної системи, необхідно шукати нові методи та підходи.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Використання оптичних методів при проведенні вимірювань на голові дорослої людини часто стикається з труднощами інтерпретації. Світло, що випромінюється глибоко в досліджувану тканину, повинно проходити через тканини, що оточують мозок (шкіру, кістки черепа, оболонки мозку), перш ніж воно досягне своєї цілі. Тому на вимірюваний сигнал впливають не тільки оксигенація самої тканини мозку, але і зміни в оксигенації і кровопостачанні екстрацеребральних тканин. Така неоднорідність вимірювання може бути значно зменшена за допомогою коротких імпульсів лазерного випромінювання і застосування диференціальної оцінки кількості фотонів, що досягають детектора в різні інтервали часу. Ця методика вимірювання та аналізу графіків часу польоту фотонів є найсучаснішим оптичним методом оцінки оксигенації та кровопостачання тканин *in-vivo*. Метод вимірювання часового розподілу фотонів також успішно використовується для оцінки стану оксигенації тканин з глибинною дискримінацією [1-2], що дозволяє проводити селективну регіональну оцінку оксигенації крові в тканині мозку.

У дослідженні кровопостачання тканини при застосуванні оптичної техніки часто використовують ефект Доплера, проте вимірювання в цьому випадку стосуються дуже малих обсягів тканин, розташованих безпосередньо під виміральною оптометриєю [3-4]. При оцінці кровопостачання більших обсягів тканини, включаючи тканину мозку, можна використовувати кореляційну дифузійну спектроскопію [5-6]. У дослідженнях кровопостачання мозку також можна використовувати оптичні маркери і рефлектометричний моніторинг їх припливу. В оптичній томографії головного мозку в якості контрастної речовини використовують барвник - індоціаніновий зелений (ICG). Це барвник з високим коефіцієнтом поглинання в ближньому інфрачервоному діапазоні [7]. Після введення болюсної дози ICG барвник метаболізується і видаляється з організму через печінку. Моніторинг за допомогою часово-розподільного оптичного методу динаміки припливу і очищення барвника ICG дозволяє ефективно оцінювати кровопостачання кори головного мозку [2, 8-9]. Через низьку токсичність цього контрастного засобу його застосування в дослідженнях на людях може розглядатися як мінімально інвазивна процедура. В роботі [10] було показано, що при вимірах із застосуванням цієї контрастної речовини лише в одному випадку з 3000 спостерігалася алергічна реакція.

### **Мета дослідження**

Пошук нових методів та підходів для усунення впливу недосконалостей виміральної системи та коригування даних вимірювань, отриманих оптичним методом.

Тестування результатів дослідження проводилось на базі Інституту біокібернетики і біомедичної інженерії ім. М. Налеча Польської академії наук (ІБІБ ПАН), який розробив пристрій дифузної оптичної томографії високої щільності (HD-DOT), здатний до дослідження головного мозку дорослої людини [2, 11-14]. Оптична вимірвальна система, що використовувалася в тестах, була випробувана *in-vivo* в обох режимах дослідження сигналу, як при дифузному відбитті, так і при вимірюванні флуоресценції ICG, проведених на групі здорових людей і у пацієнтів з запаленням мозку.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Розроблена та побудована в лабораторії біомедичної оптики ІБІБ ПАН система для формування та аналізу кровопостачання та оксигенації головного мозку спочатку була побудована та зібрана в лабораторних умовах для перевірки всіх компонентів, проведення тестів на фантомах, імітуючих тканину, та оптимізації процедур тестування на голові пацієнта. Блок-схема системи оптичної томографії мозку, розроблена з використанням методики вимірювання часу польоту фотонів, показана на рис.1 [1, 13].

Електричні імпульси від фотопомножувачів після посилення переходять до системи, синхронізованої під час підрахунку одиночних фотонів (Time Correlated Single Photon Counting - TCSPC),

реалізованих у вигляді восьми PCI карт, розміщених у промисловому комп'ютері. Контроль вимірювання та отримання графіків часу польоту фотонів, проведений в середовищі LabView (National Instruments, США).

Дослідження оптичної томографії головного мозку проводилися з використанням 8-канальної системи для вимірювання часового розподілу польоту фотонів (рис.1), що дало можливість одночасної візуалізації припливу контрастної речовини до обох півкуль мозку.

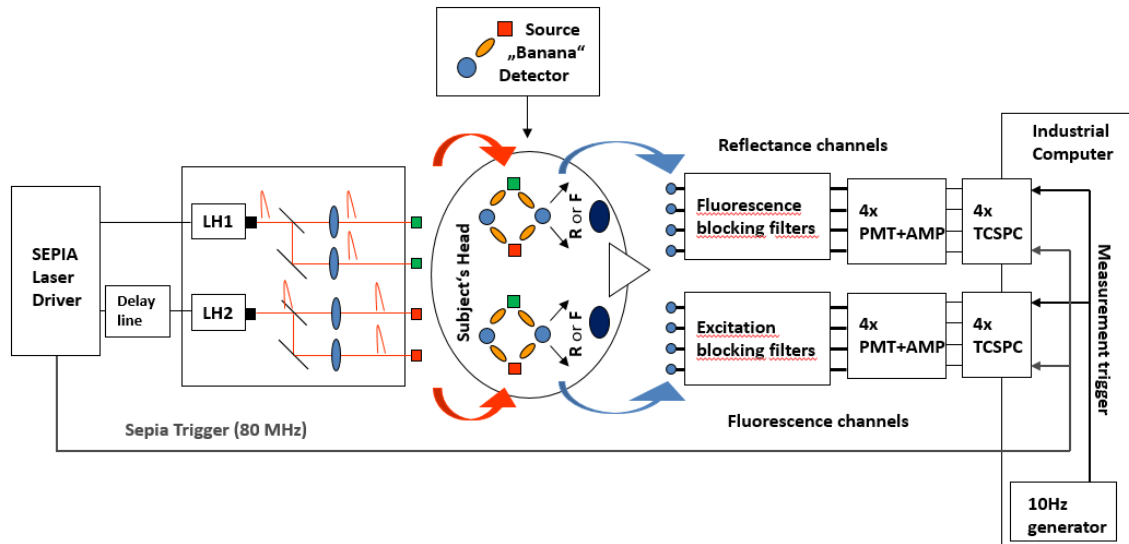


Рис.1. Оптична система для візуалізації кровопостачання та оксигенації мозку (LH1, LH2 - лазерні головки 687nm, 832nm, PMT + AMP фотопомножувачі з передпідсилювачами, TCSPC - карти для кореляції однофотонного підрахунку)

Контрастна речовина ICG вводилася суб'єктам шляхом внутрішньовенної ін'єкції передпліччя, після отримання їхньої письмової згоди, а у разі вимірювань на групі пацієнтів – зі згоди лікаря-терапевта для цього типу обстеження. Вводили 5 мг ICG (Pulsion, Germany), розчиненого в 3 мл води для ін'єкцій. Вимірювання проводилося в лежачому положенні. Ін'єкція контрасту була у формі "болюсу", тобто в найкоротші терміни, коливалась від 1 с до 2 с. Тривалість дослідження становила близько 10 хвилин, включаючи підготовку пацієнта до дослідження. Оптична вимірювальна система була вручну прикладена і збережена на голові пацієнта (рис.2). Вся процедура вимірювання з використанням часово-розподільного оптичного методу з одночасним внутрішньовенним введенням ICG була попередньо узгоджена з біоетичною комісією.

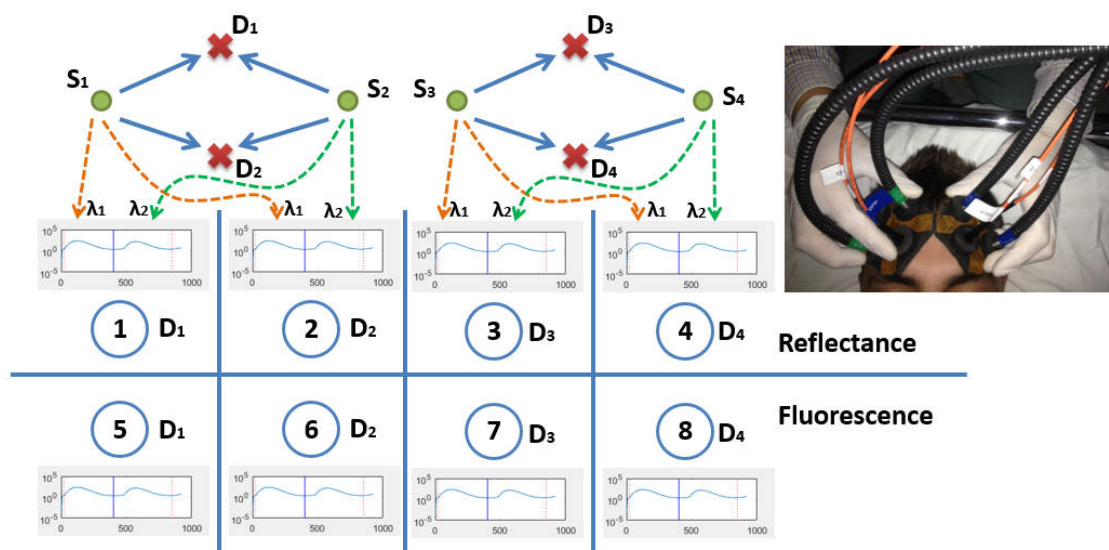


Рис.2. Схема вимірювання та створення вихідних даних (S1-S4 – джерела випромінювання, D1-D4 – детектори,  $\lambda_1$ -  $\lambda_2$  - одна вибірка на канал)

На рис.2 представлено схему вимірювання з 16 каналів (джерело випромінювання - детектор), результати яких записуються в 8 файлах відповідно для дифузного відбиття і флуоресценції (1 - 4 (8 каналів для дифузного відбиття ( $S1-D1, S2-D1, S1-D2, S2-D2, S3-D3, S4-D3, S3-D4, S4-D4$ )), 5-8 (8 каналів для флуоресценції ( $S1-D1, S2-D1, S1-D2, S2-D2, S3-D3, S4-D3, S3-D4, S4-D4$ )).

Аналіз результатів тестів, проведених за методом оптичної томографії головного мозку, базується на методі, розробленому членами лабораторії біомедичної оптики ІБІП ПАН в попередні роки, де зміни коефіцієнта поглинання як функції глибини досліджуваної тканини визначаються на основі зміни статистичних моментів часу польоту фотонів та їх коефіцієнтів чутливості [2, 9]. Цей метод дозволяє відокремити інформацію про кровопостачання кори головного мозку від інформації про кровопостачання шкіри та інших екстрацеребральних структур. Розглянуто зміни у трьох статистичних моментах реєстрованих графіків часу польоту фотонів:  $N_{tot}$  - момент нульового порядку (загальна кількість фотонів у розподілі);  $\langle t \rangle$  - момент першого порядку (середній час польоту фотонів),  $V$  - централізований момент другого порядку (дисперсія розподілу часу фотонного польоту). З попередніх аналізів і звітів з теорії статистичних моментів розподілу часу польоту фотонів можна зробити висновок, що дисперсія є більш чутливим параметром до змін коефіцієнта поглинання, що відбуваються в глибинних шарах, тоді як загальна кількість фотонів чутлива до змін поверхневих шарів [1, 2].

Для наочності представимо математичні вирази (1-3) для вимірюваних величин, що використовуються для отримання змін поглинання, які відбуваються в різних шарах багатошарової моделі тканини голови. Більш конкретно, цей підхід описаний в [2,9].

$$N_{tot} = \sum_{k=1}^M N_k ; \quad (1)$$

$$\langle t \rangle = \sum_{k=1}^M t_k N_k / N_{tot} ; \quad (2)$$

$$V = \left( \sum_{k=1}^M t_k^2 N_k / N_{tot} \right) - \langle t \rangle^2 , \quad (3)$$

де  $k = 1, \dots, M$  - часові канали,  $N_k$  - кількість фотонів у каналі  $k$ ,  $N_{tot}$  - загальна кількість фотонів,  $t_k$  - час польоту фотонів у каналі  $k$ ,  $\langle t \rangle$  - середній час польоту фотонів,  $V$  - дисперсія розподілу часу польоту фотонів. Середній час відображає середню довжину шляху фотонів, що рухаються між джерелом і детектором, тоді як дисперсія є мірою розсіювання відстані, пройдені фотонами.

Аналіз розподілу часу польоту фотонів (DTOF - distributions of times of flight) виявив порушення сигналу, які генерують помилку при розрахунку статистичних моментів. На рис. 3 представлені результати реєстрації зразка у одного з обстежених пацієнтів, де можна спостерігати суттєві відмінності у формах моментів для різних пар емітер-детектор. Передбачається, що така неоднорідність викликана перш за все апаратними проблемами.

Основною ідеєю нового методу є розділення чотирьох областей на осі часу прильоту фотонів (по відношенню до флуоресценційного лазерного сигналу), які містять піки, що відповідають збільшенню кількості фотонів і представляють графіки часу польоту фотонів (рис.4). Потім для кожної окремої області обчислюються статистичні моменти. У цьому випадку ізольовані ділянки 2 і 3 містять DTOF, виміряні in-vivo за допомогою вимірювальної оптики S1-D1 і S2-D1, відповідно: delta.DTOF (S1-D1) і delta.DTOF (S2-D1). Області 1 і 4 (delta\_begin і delta\_end, відповідно) являють собою порушення сигналу, які вводять помилку при розрахунку статистичних моментів і зміни коефіцієнта поглинання.

Для того, щоб виправити отримані статистичні моменти, ми розділимо головні DTOF-сигнали "delta.DTOF (S1-D1)" і "delta.DTOF (S2-D1)" на частину "delta-end". Для цього ми попередньо нормалізуємо "delta-end", використовуючи рівняння (4):

$$\frac{\sum_{t=1}^K N(t)}{K} = 1. \quad (4)$$

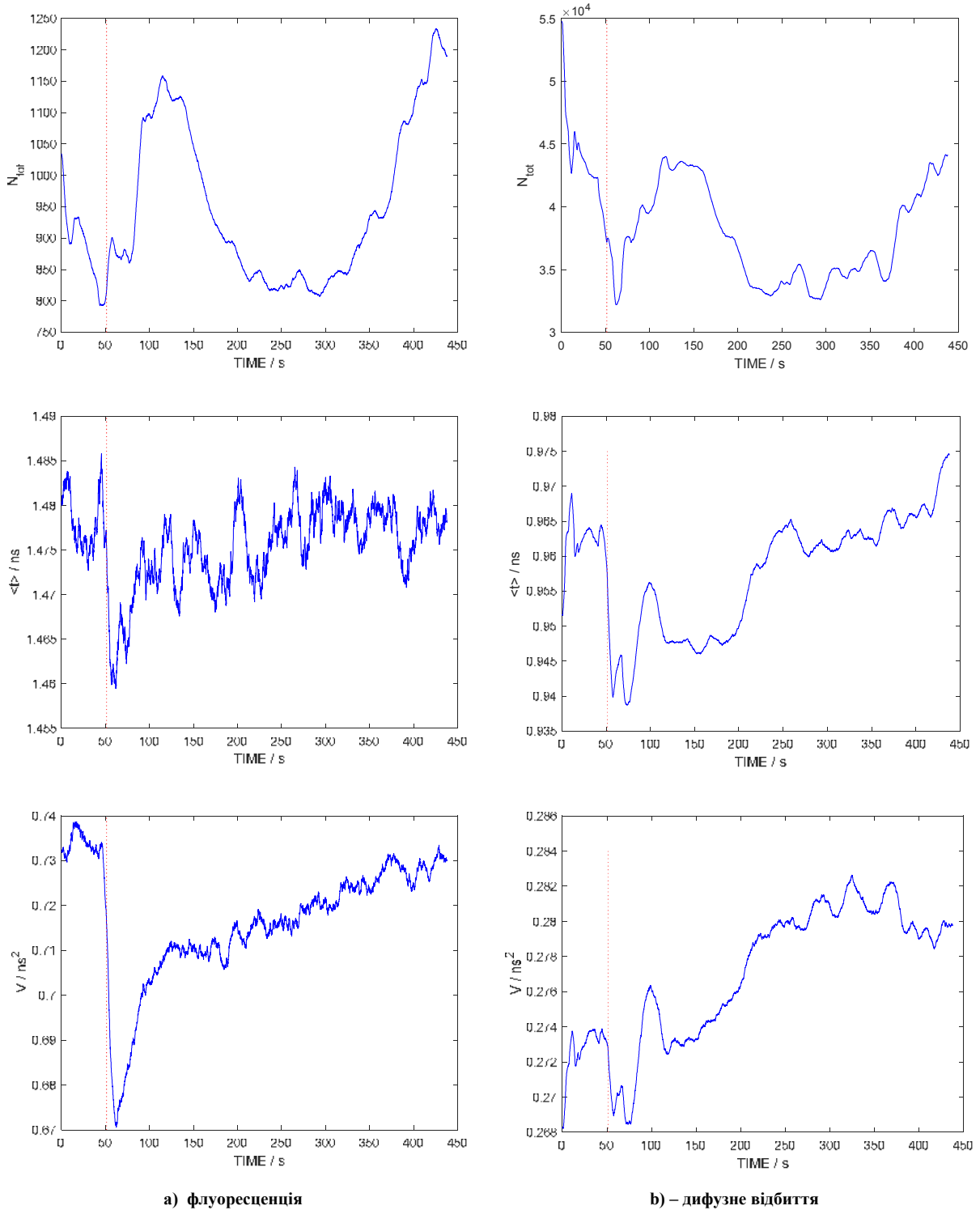


Рис. 3. Зміни в розрахункових моментах DTOF (в верхній частині -  $N_{tot}$ , середня частина -  $\langle t \rangle$ , нижня частина -  $V$ ) при внутрішньовенному введенні ICG через 50 секунд, отримані за допомогою оптодів S1-D1

Таким чином, скориговані статистичні моменти будуть мати такий вигляд (5-7):

$$\Delta N_{new} = \Delta N_{DTOF} / \Delta N_{end}; \quad (5)$$

$$\Delta \langle t \rangle_{new} = \Delta \langle t \rangle_{DTOF} / \Delta \langle t \rangle_{end}; \quad (6)$$

$$\Delta V_{new} = \Delta V_{DFOB} / \Delta V_{end} \quad (7)$$

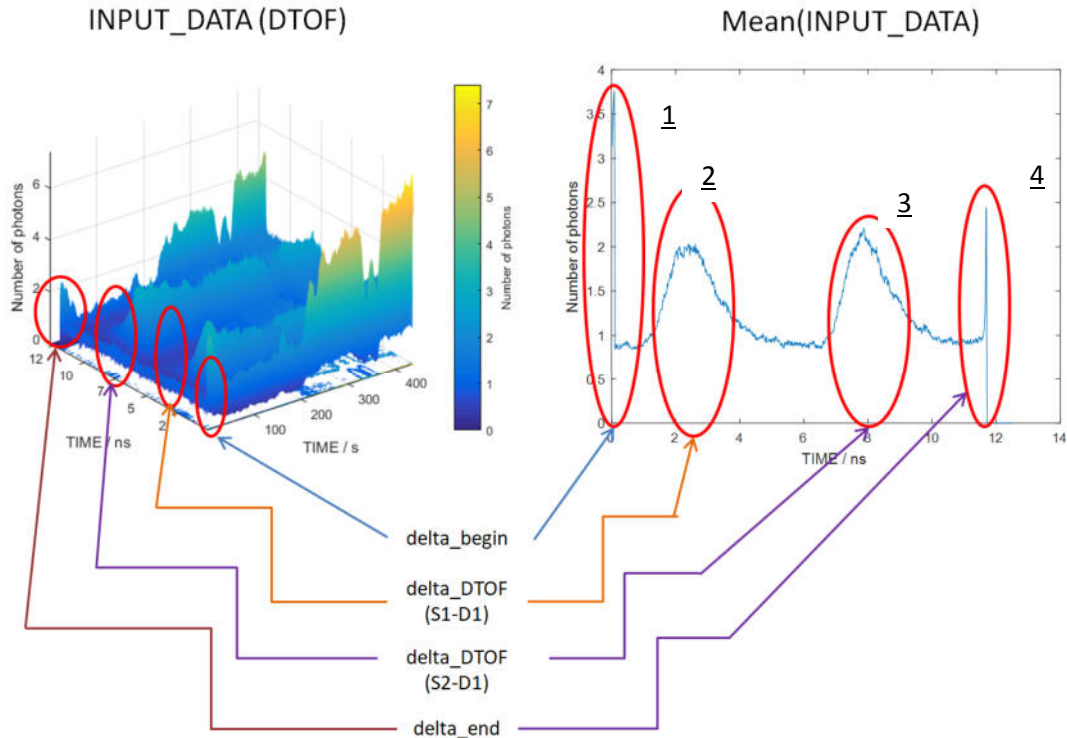


Рис. 4. Відокремлені чотири ділянки на часовій шкалі польоту фотонів, які містять піки, що відповідають збільшенню кількості фотонів: а) 3D ділянка DFOB (S1-D1, S2-D1), б) середні значення DFOB (S1-D1, S2-D1)

На рис. 5 показано результат реєстрації та коригування статистичних моментів, проведеного у одного з обстежених пацієнтів для флуоресцентного та каналу дифузного відбиття: а), б) - загальна кількість фотонів у розподілі з усіх 4 частин ( $\Delta N_{DFOB}$ ,  $\Delta N_{end}$ ,  $\Delta N_{begin}$ ,  $\Delta N_{DFOB}/\Delta N_{end}$ ) для флуоресцентних та каналів дифузного відбиття відповідно; с), д) - середній час польоту фотонів ( $\Delta \langle t \rangle_{DFOB}$ ,  $\Delta \langle t \rangle_{end}$ ,  $\Delta \langle t \rangle_{begin}$ ,  $\Delta \langle t \rangle_{DFOB}/\Delta \langle t \rangle_{end}$ ); е), ф) - дисперсія розподілу часу польоту фотонів ( $\Delta V_{DFOB}$ ,  $\Delta V_{end}$ ,  $\Delta V_{begin}$ ,  $\Delta V_{DFOB}/\Delta V_{end}$ ).

Наведені рисунки чітко показують, що новий метод дуже добре коригує нульовий статистичний момент - загальне число фотонів для флуоресцентних каналів. На наступному етапі дослідження необхідно було виконати порівняння основних статистичних моментів для здорових людей та пацієнтів. Для цього використовувався підхід для розрахунку різниці між мінімальними та максимальними значеннями для всіх статистичних моментів від моменту інжекції контрастної речовини до кінця вимірювання (рис.6). Результати розрахунку попередньо нормуються від 0 до 1 для порівняння рівнів сигналів різних каналів.

Результати розрахунків для всіх каналів отримуємо, використовуючи рівняння (8-13):

$$\Delta N_{\max-\min,j} = \Delta N_{\max,j} - \Delta N_{\min,j}; \quad (8)$$

$$\Delta \langle t \rangle_{\max-\min,j} = \Delta \langle t \rangle_{\max,j} - \Delta \langle t \rangle_{\min,j}; \quad (9)$$

$$\Delta V_{\max-\min,j} = \Delta V_{\max,j} - \Delta V_{\min,j}; \quad (10)$$

$$\langle \Delta N \rangle_{\max-\min} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta N_{\max-\min,j}; \quad (11)$$

$$\langle \Delta \langle t \rangle \rangle_{\max-\min} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta \langle t \rangle_{\max-\min,j}; \quad (12)$$

$$\langle \Delta V \rangle_{\max-\min} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta V_{\max-\min,j}; \quad (13)$$



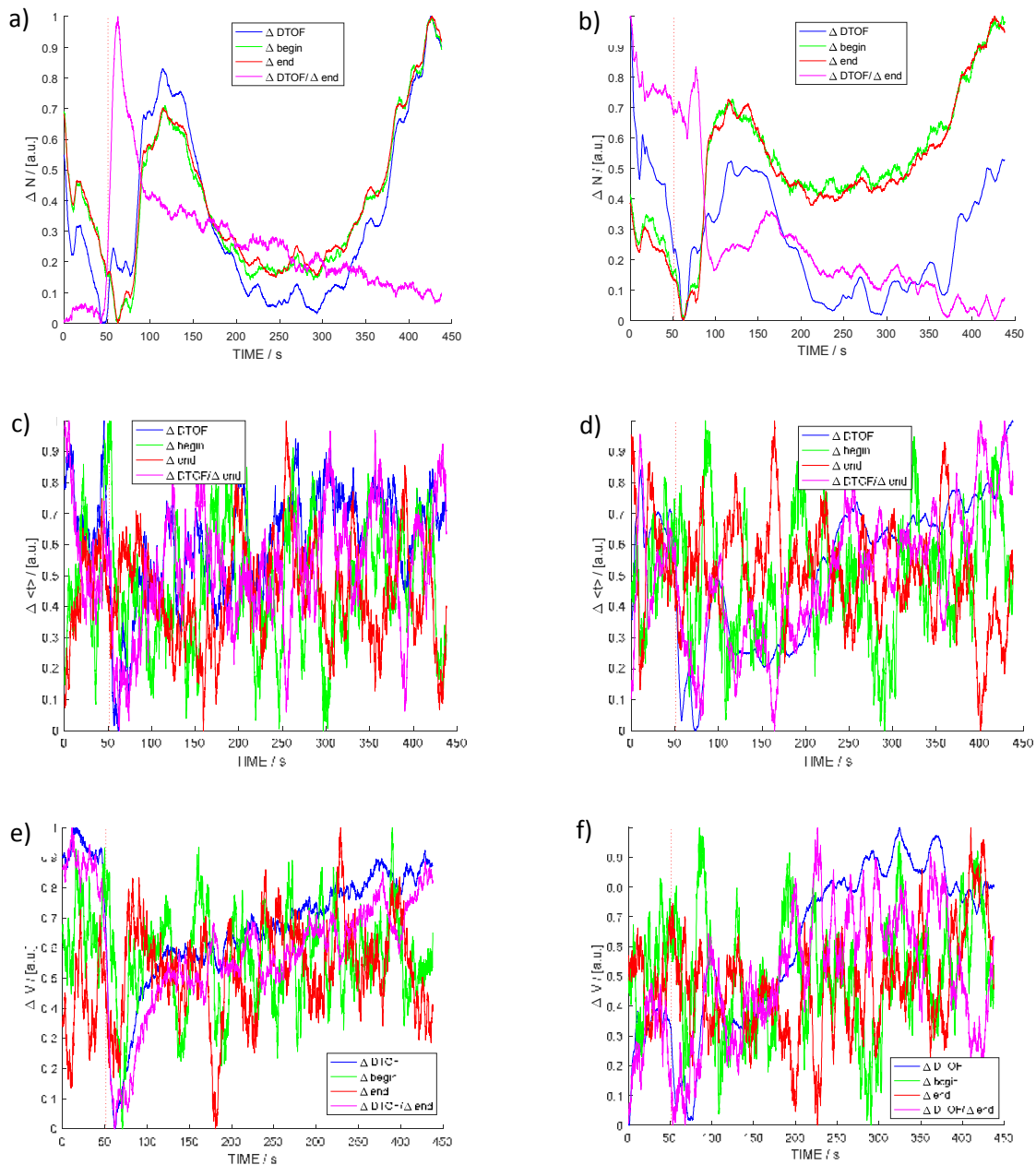


Рис. 5. Результати реєстрації та коригування основних статистичних моментів, проведених у одного з обстежених пацієнтів для флуоресцентного та каналу дифузного відбиття(S1-D1) з усіх 4 частин ( $\Delta_{\text{DTOF}}$ ,  $\Delta_{\text{end}}$ ,  $\Delta_{\text{begin}}$ ,  $\Delta_{\text{DTOF}/\Delta_{\text{end}}}$ ):  
а), с), е) – флуоресценція; б), д), ф) - дифузне відбиття

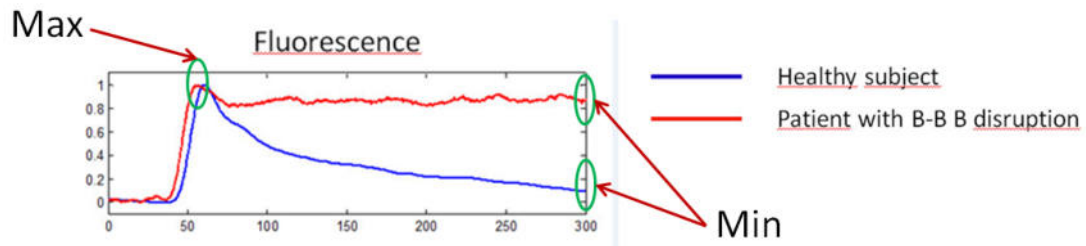


Рис. 6. Вид флуоресцентного сигналу  $N_{\text{tot}}$  та підхід до розрахунку різниці між мінімальними і максимальними значеннями для статистичних моментів

де:  $\Delta N_{\max-\min,j}$  - різниця між мінімальним і максимальним значеннями загальної кількості фотонів у каналі  $j$ ;  $j = 1..M$  - кількість каналів (S1-D1, S2-D1, S1-D2, S2-D2, S3-D3, S4-D3, S3-D4, S4-D4);  $\Delta \langle t \rangle_{\max-\min,j}$  - різниця між мінімальним і максимальним значеннями середнього часу польоту фотонів у каналі  $j$ ;  $\Delta V_{\max-\min,j}$  - різниця між мінімальними і максимальними значеннями дисперсії розподілу часу польоту фотонів у каналі  $j$ ;  $\langle \Delta N \rangle_{\max-\min}$  - середня різниця між мінімальним і максимальним значеннями загальної кількості фотонів з усіх каналів в області одного пацієнта;  $\langle \Delta \langle t \rangle \rangle_{\max-\min}$  - середня різниця між мінімальним і максимальним значеннями середнього часу польоту фотонів з усіх каналів в області одного пацієнта;  $\langle \Delta V \rangle_{\max-\min}$  - середня різниця між мінімальними і максимальними значеннями дисперсії розподілу часу польоту фотонів в області одного пацієнта.

Для порівняння отриманих результатів в розрізі основних статистичних моментів між групою здорових людей та пацієнтів з запаленням мозку використовувався критерій Вілкоксона (Табл. 1).

Таблиця 1. Результати порівняння між групою здорових людей та пацієнтів

|                                        | Пацієнти (n=24) | Контрольна група (n=16) | p      |
|----------------------------------------|-----------------|-------------------------|--------|
| $\Delta N_{\max-\min}$                 | $0.42 \pm 0.22$ | $0.75 \pm 0.12$         | <0.001 |
| $\Delta \langle t \rangle_{\max-\min}$ | $0.35 \pm 0.16$ | $0.69 \pm 0.21$         | <0.001 |
| $\Delta V_{\max-\min}$                 | $0.36 \pm 0.24$ | $0.61 \pm 0.21$         | <0.001 |

За результатами, представленими в Табл.1, чітко видно, що група пацієнтів і контрольна група з усіх статистичних моментів мають статистичну значущість ( $p < 0.001$ ).

### Висновки

Новий метод добре коригує нульовий статистичний момент - загальне число фотонів для флуоресцентних каналів, особливо, коли сигнали дуже неоднорідні через проблеми з апаратним забезпеченням. Особливий інтерес для подальших досліджень представляє пошук нових методів і підходів до аналізу розподілу часу польоту фотонів з метою усунення впливу недосконалості вимірювальної системи та порівняння результатів різними методами.

### Список використаної літератури

- [1] Kacprzak M., et al. Time-Resolved Optical Imager for Assessment of Cerebral Oxygenation. *J Biomed Opt.* 2007. Vol. 12. P. 1-14.
- [2] Liebert A., et al. Time-resolved multidistance near-infrared spectroscopy of the adult head: intracerebral and extracerebral absorption changes from moments of distribution of times of flight of photons. *Applied Optics.* 2004. Vol. 43(15). P. 3037-3047.
- [3] Stern M. In vivo evaluation of microcirculation by coherent light scattering. *Nature.* 1975. Vol. 254. P. 56-58.
- [4] Stern M., et al. Continuous measurement of tissue blood flow by laser Doppler spectroscopy. *Am. J. Physiol.* 1977. Vol. 232. P. F441-F448.
- [5] Kim M. N., et al. Noninvasive measurement of cerebral blood flow and blood oxygenation using near-infrared and diffuse correlation spectroscopies in critically brain-injured adults. *Neurocrit Care.* Vol. 12(2). P. 173-80.
- [6] Goff D. A., et al. Noninvasive cerebral perfusion imaging in high-risk neonates. *Semin Perinatol.* Vol. 34(1). P. 46-56.
- [7] Landsman M. L., et al. Light-absorbing properties, stability, and spectral stabilization of indocyanine green. *J Appl Physiol.* 1976. Vol. 40(4). P. 575-583.
- [8] Liebert A., et al., Non-invasive detection of fluorescence from exogenous chromophores in the adult human brain. *Neuroimage.* 2006. Vol. 31(2). P. 600-608.
- [9] Liebert A., et al. Bed-side assessment of cerebral perfusion in stroke patients based on optical monitoring of a dye bolus by time-resolved diffuse reflectance. *Neuroimage.* 2005. Vol. 24(2). P. 426-435.

- [10] Hope-Ross M., et al. Adverse reactions due to indocyanine green. *Ophthalmology*. 1994. Vol. **101**(3). P. 529-533.
- [11] Sawosz P., et al. Experimental estimation of the photons visiting probability profiles in time-resolved diffuse reflectance measurement. *Phys. Med. Biol.* 2012. Vol. 57(23). P. 7973–7981.
- [12] Guchek P., Bejm K., Sawosz P., Liebert A. Data acquisition and preprocessing software for high-density near-infrared spectroscopy device. *20-th Polish Conference on Biocybernetics and Biomedical Engineering* (Kraków, September 20-22, 2017). Kraków: AGH University of Science and Technology, 2017. P. 41.
- [13] Maniewski R., Liebert A., Kacprzak M. Time Resolved Optical Spectroscopy System for Cerebral Oxygenation Imaging. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2005. P. 201-204.
- [14] Weigl W., et al. Confirmation of brain death using optical methods based on tracking of an optical contrast agent: assessment of diagnostic feasibility. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8(1). 7332. P. 1-11.

#### References

- [1] Kacprzak M., et al., Time-Resolved Optical Imager for Assessment of Cerebral Oxygenation. *J Biomed Opt.* 2007. Vol. 12. P. 1-14.
- [2] Liebert A., et al., Time-resolved multidistance near-infrared spectroscopy of the adult head: intracerebral and extracerebral absorption changes from moments of distribution of times of flight of photons. *Applied Optics*. 2004. Vol. 43(15). P. 3037-3047.
- [3] Stern M. In vivo evaluation of microcirculation by coherent light scattering. *Nature*. 1975. Vol. 254. P. 56-58.
- [4] Stern M., et al., Continuous measurement of tissue blood flow by laser Doppler spectroscopy. *Am. J. Physiol.* 1977. Vol. 232. P. F441-H448.
- [5] Kim M. N., et al., Noninvasive measurement of cerebral blood flow and blood oxygenation using near-infrared and diffuse correlation spectroscopies in critically brain-injured adults. *Neurocrit Care*. Vol. **12**(2). P. 173-80.
- [6] Goff D. A., et al., Noninvasive cerebral perfusion imaging in high-risk neonates. *Semin Perinatol*. Vol.**34**(1). P. 46-56.
- [7] Landsman M. L., et al., Light-absorbing properties, stability, and spectral stabilization of indocyanine green. *J Appl Physiol*. 1976. Vol. **40**(4). P. 575-583.
- [8] Liebert A., et al., Non-invasive detection of fluorescence from exogenous chromophores in the adult human brain. *Neuroimage*. 2006. Vol. **31**(2). P. 600-608.
- [9] Liebert A., et al., Bed-side assessment of cerebral perfusion in stroke patients based on optical monitoring of a dye bolus by time-resolved diffuse reflectance. *Neuroimage*. 2005. Vol. **24**(2). P. 426-435.
- [10] Hope-Ross M., et al., Adverse reactions due to indocyanine green. *Ophthalmology*. 1994. Vol. **101**(3). P. 529-533.
- [11] Sawosz P., et al., Experimental estimation of the photons visiting probability profiles in time-resolved diffuse reflectance measurement. *Phys. Med. Biol.* 2012. Vol. 57(23). P. 7973–7981.
- [12] Guchek P., Bejm K., Sawosz P., Liebert A. Data acquisition and preprocessing software for high-density near-infrared spectroscopy device. *20-th Polish Conference on Biocybernetics and Biomedical Engineering* (Kraków, September 20-22, 2017). Kraków: AGH University of Science and Technology, 2017. P. 41.
- [13] Maniewski R., Liebert A., Kacprzak M. Time Resolved Optical Spectroscopy System for Cerebral Oxygenation Imaging. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2005. P.201-204.
- [14] Weigl W., et al. Confirmation of brain death using optical methods based on tracking of an optical contrast agent: assessment of diagnostic feasibility. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8(1). 7332. P. 1-11.

УДК 681.3.06

N.L. DOROSH, L.N. PETRECHUK, T.M. FENENKO  
National Metallurgical Academy of Ukraine**DESIGN AND USE OF EXCEL ADD-IN FOR TIME SERIES ANALYSIS**

*Developed MS Excel add-in (XLA) for time series analysis. The methods used are exponential smoothing, non-linear Box-Cox transformation and smoothing based on digital filtering and spectral data analysis algorithms. Results are stored both numerically and graphically, and can be used for further processing. The relevance of the work is justified by the convenience of presenting time series in spreadsheets and the popularity of MS Excel. The results of medical information processing are presented. A comparison with the results obtained in the package ITSM2000.*

*Keywords: Excel add-in, time series, smoothing, spectral analysis, cyclic changes*

Н.Л. ДОРОШ, Л.М. ПЕТРЕЧУК, Т.М. ФЕНЕНКО  
Національна металургійна академія України**РОЗРОБКА І ЗАСТОСУВАННЯ НАДБУДОВИ EXCEL ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ**

*Розроблено надбудову MS Excel для аналізу часових рядів. Використано методи експоненціального згладжування, нелінійного перетворення Бокса-Кокса, згладжування на основі алгоритмів цифрової фільтрації і спектрального аналізу даних. Результати зберігаються як в числовому, так і в графічному вигляді, і можуть бути використані для подальшої обробки. Актуальність роботи обумовлена зручністю подання часових рядів в електронних таблицях та популярністю MS Excel. Представлені результати обробки медичної інформації. Проведено порівняння з результатами, які отримані в пакеті ITSM2000.*

*Ключові слова: надбудова Excel, часові ряди, згладжування, спектральний аналіз, циклічні зміни*

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НАДСТРОЙКИ EXCEL ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ**

*Разработана надстройка MS Excel для анализа временных рядов. Использованы методы экспоненциального сглаживания, нелинейного преобразования Бокса-Кокса, сглаживания на основе алгоритмов цифровой фильтрации и спектрального анализа данных. Результаты сохраняются как в числовом, так и в графическом виде, и могут быть использованы для дальнейшей обработки. Актуальность работы обоснована удобством представления временных рядов в электронных таблицах и популярностью MS Excel. Представлены результаты обработки медицинской информации. Проведено сравнение с результатами, которые получены в пакете ITSM2000.*

*Ключевые слова: надстройка Excel, временные ряды, сглаживание, спектральный анализ, циклические изменения*

**Problem Statement**

The prevalence and convenience of the Ms Excel spreadsheet has made it one of the most popular software products for performing versatile calculations. Another important advantage is possibility of various programmatic modules to connect to MS Excel as add-in [1].

The urgency of developing such software is due, on the one hand, to the widespread use of MS Excel and its usability, and on the other, to the lack of a number of built-in functions that are necessary to solve this class of tasks.

The main reasons for creating a superstructure.

1. It is necessary to restrict access to the code and worksheets. When an application is distributed as an add-in, it is protected with a password.

2. Data is separated from the program. Data is in the columns of MS Excel spreadsheets. The add-in was developed in C ++ Builder and connected to MS Excel. Thus, access to the worksheet functions is simplified.

3. License agreements are not violated, provided that MS Office is licensed.

**Purpose of the Study**

The purpose of this work was to create an add-in, modules of which allow performing of the time series smoothing, its transformation by the Box-Cox method and smoothing by digital filter with finite impulse response (FIR) and time series analysis.

The object of the research is time series, which is processed in the projected add-in.

The subject of the research is methods of data smoothing, which are used in the developed add-in.

New add-in is designed to work with time series and allows you to get their numerical and graphical form. After processing by any algorithm, the data obtained will be displayed on MS Excel worksheet.

#### Presentation of the Main Research Materials

The new add-in provides additional functionality for processing of time series in the MS Excel New add-in provides additional functional possibilities of treatment of sentinel rows in the processor of MS Excel [2] and uses functions that are in the library dll-file. The following features are implemented in the functions: viewing of the time series data; non-linear Box-Cox transformation (Box - Cox Transformation);, smoothing by a digital filter with finite impulse response (FIR).

Functions are implemented in C ++ language in C ++ Builder environment. Standard dll files are created by C ++ Builder compilers [3] and use the internal programming language VBA (Visual Basic for Applications) in the project. Functions of the standard dll can not be induced directly from the worksheet, or from MS Excel macros sheet [1]. Special interface functions are built for this purpose.

The add-on implements the method of exponential smoothing, non-linear Box-Cox transformation and smoothing with an FIR filter.

Exponential smoothing of the signal in the module of add-in is carried out according to the recurrence formula:

$$S(t) = \alpha \cdot x(t) + (1 - \alpha) \cdot S(t - 1) \quad (1)$$

where  $\alpha$  - is a smoothing parameter;  $S(t)$  - smoothed time series value  $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_t\}$ .

The value of the smoothing parameter  $\lambda$  is within 0 - 1, It is recommended to select the value - from 0.35 to 1.

Nonlinear transformation of signal by the Box-Cox method

Smoothing of time series  $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_T\}$  is carried out under a formula:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{X(t)^\lambda - 1}{\lambda} & \rightarrow \lambda \neq 0 \\ \ln(X(t)) & \rightarrow \lambda = 0 \end{cases} \quad (2)$$

where  $S(t)$  - smoothed value,  $\lambda$  - parameter.

Maximization of the likelihood function logarithm (maximum log-likelihood function) is one of the methods for determining the optimum value of the  $\lambda$  parameter:

$$f(x, \lambda) = -\frac{N}{2} \ln \left[ \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i(\lambda) - \bar{x}(\lambda))^2}{N} \right] + (\lambda - 1) \sum_{i=0}^{N-1} \ln(x_i) \quad (3)$$

where  $N$  - number of observations ;

$x$  - time series observation;

$\bar{x}$  - average value time series observations

$$\bar{x}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(\lambda) \quad (4)$$

That is, it is necessary to choose such  $\lambda$  parameter value, at which this function takes a maximum value.

In the developed smoothing add-on by linearly filtering of output data with digital filter with finite impulse response is implemented in several ways: averaging over  $n$  points ( $n=3-15$ ); method of parabola through a few equidistant values of signal, with the further use in quality of the smoothed out size of value of parabola in a middle point ( $n=5, 7, 9, 11, 13$ ); av of Spenser for 15 and 21 points [4].

Smoothing of the signal by three points was carried out according to the formula:

$$Y(n) = (X(n-2) + X(n-1) + X(n) + X(n+1) + X(n+2)) / 3 \quad (5)$$

Smoothing by the Spencer method on the 21st point was carried out according to the formula:

$$x_i = \frac{1}{320} (-3x_{i-7} - 6x_{i-6} - 5x_{i-5} + 3x_{i-4} + 21x_{i-3} + 46x_{i-2} + 67x_{i-1} + 74x_i + 67x_{i+1} + 46x_{i+2} + 21x_{i+3} + 3x_{i+4} - 5x_{i+5} - 6x_{i+6} - 3x_{i+7}) \quad (6)$$

Spectral analysis of the signal is intended for the estimation of frequency composition of discrete signal [5]. Nonparametric methods are based on the calculation of estimates of the spectral power density (SPD)



immediately after counting the initial sequence, determines their main advantages - possibility of applying to a wide class of stationary signals and noise and high computational efficiency due to the application of Fast Fourier Transform (FFT) algorithms.

For the estimation of the spectral power density, the periodogram method, is used [6], which main point is in the calculation of estimation of SPD of eventual casual sequence of length of N, was called the periodogram.

$$\mathcal{S}(\omega) = \frac{|X(e^{j\omega T})|^2}{Nf_{\Delta}} \quad (7)$$

where  $X(e^{j\omega T})$  - spectral density of a finite sequence  $x(n)$ .

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega Tn} \quad (8)$$

For diminishing of spectrum spreading effect at the calculation of periodogram by means of discrete Fourier transform (DFT) and, as a result, smoothing of periodogram, weigh functions (windows) are applied, and the modified periodogram, called the modified periodogram, becomes:

$$\mathcal{S}_w(\omega) = \frac{\frac{1}{f_{\Delta}} |X_w(e^{j\omega T})|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |w(n)|^2} \quad (9)$$

where  $w(n)$  - weight function (window) of length N;

$X_w(e^{j\omega T})$  - spectral density of multiplication of  $x(n) \cdot w(n)$  :

$$X_w(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n)e^{-j\omega Tn} \quad (10)$$

The window function of the FFT is used to suppress edge discontinuity effects of the discontinuity of real functions by introducing weighting coefficients for fetching data in the window, which provide a reduction in the amplitude of the edge points (start and stop) and, as a result, improve the results of the FFT. Different types of window functions (rectangular window, Hemminga, Hanninga, Blackmana-Harrisa) give different results, both in accuracy, and in frequent resolution and apply for various kinds of signals [7].

The Hamming window is applied in this work.

Let  $X=\{x_1, x_2, x_3 \dots x_N\}$  - time series which is given,  $Y=\{y_1, y_2, y_3 \dots y_N\}$  - time series (signal) after smoothing.

Convolution of the signal has the form:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(n-m)x(m) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m)x(n-m) \quad (11)$$

where  $m$  - delay of sequence,  $h(n)$  - impulsive description (IX).

$H(z)$  - z-Figure of IX of  $h(n)$  - calculated by a formula:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n)z^{-n} \quad (12)$$

The transmission function of  $H(z)$  is :

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (13)$$

where  $X(z)$ ,  $Y(z)$ , - z - The image of the signal before and after processing.

Let  $H\left(e^{j\omega T}\right)$  - Fourier - an image of IX of  $h(n)$ , where is normalized frequency.

For the frequency description and the transfer function  $H(x)$ , the following relation is true:

$$H\left(e^{j\omega}\right)=H(z)\Big|_{z=e^{j\omega}} \quad (14)$$

In the created add-in, an analysis of the time series, reflecting the number of citizens, who for the first time appealed to the treatment and prophylactic institutions of Ukraine with complaints about the digestive system, is carried out. Output data - monthly amount of patients, who applied for the period from January 2006 to December 2015.

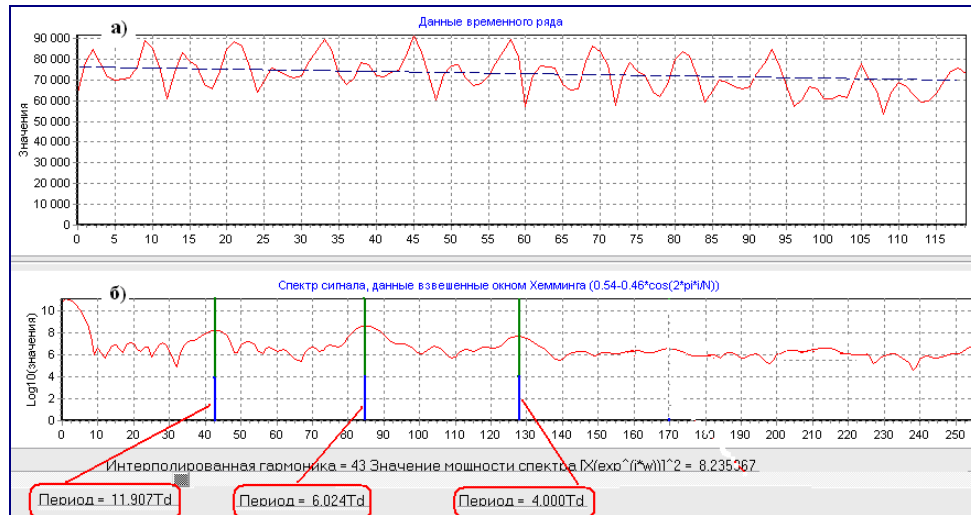


Figure 1. Time series showing the figures for the 10 years

The graphic image of the time series under study is shown on Figure 1 and gives the the initial idea of the changing statistics (number of patients) over the past 10 years. Visually on the chart, you can select:

- The long-term trend - The dashed line goes gradually downwards (Figure 1a);
- Cyclic changes which are usually related to the vibrations of physiology activity of of the human body (Figure 1a);
- Seasonal fluctuations (Figure of 1b);
- Irregular fluctuations associated with unpredictable random events (Figure 1b).

On the Figure 1-b the signal spectrum (smoothed by the Hamming window) is represented, harmonics, which correspond to the values of the periods of 12, 6 and 4. Based on the fact that the time series, which is analyzed, consists of monthly indications Coming from that a sentinel row which is analysed consists of monthly testimonies (I.e., has a discretization step in time  $T_d = 1$ ), the figures indicate that the arrival of citizens in medical institutions has a certain pattern, has three different time periods: : annual (12 months) semi-annual (6 months) and seasonal (winter, spring, summer, autumn - 4 months).

Graphical representation of data series after processing by the method of exponential smoothing (in the add-in) for different values of the parameter  $\alpha$  is given in the Figure 2.

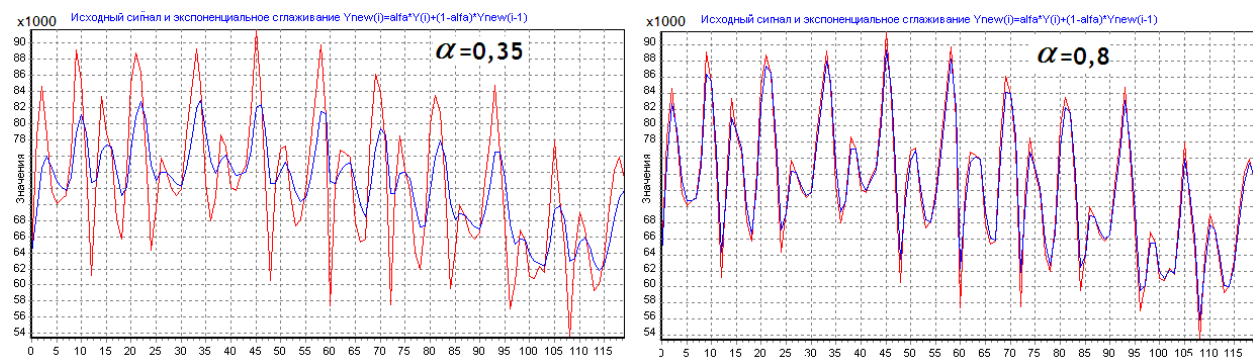


Figure 2. Method of exponential smoothing

Authenticity of any results is done by comparison. Similar processing of data in relation to the appeal of to medical institutions was carried out in the application ITSM2000 application [8].

Figure 3 shows the screen types of ITSM 2000 applications and add-ins for Excel algorithm of nonlinear Box-Cox transformation. The results are alike in the graphical form. Comparative analysis of the Figures is qualitative.

Figure 4 shows the periodogram that was made in ITSM 2000. Peak at the area of a certain frequency  $\omega_0$  indicates that corresponding harmonious component is present in the spectral decomposition of the autocorrelation function. The higher and sharper the peak is allocated, the bigger part of the power is concentrated near the frequency  $\omega_0$  and the more important role this frequency plays in the description of the corresponding random process [9].

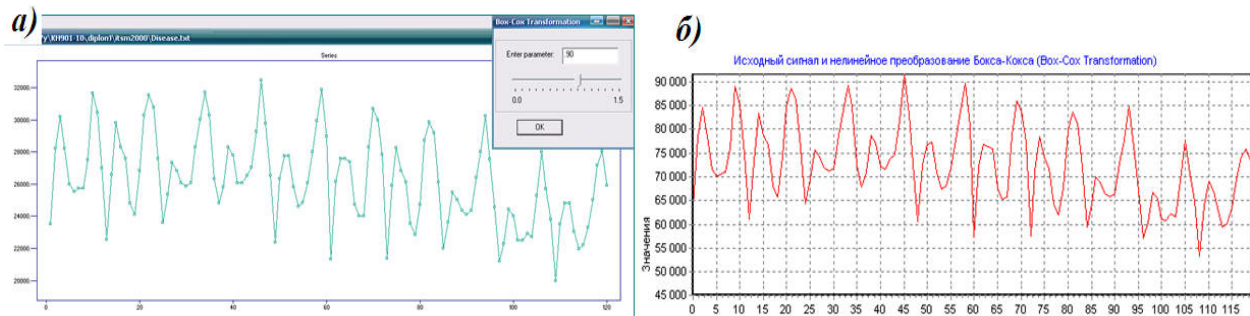


Figure 3. a) Non-linear Box-Cox transformation - in ITSM 2000, б) - in add-in

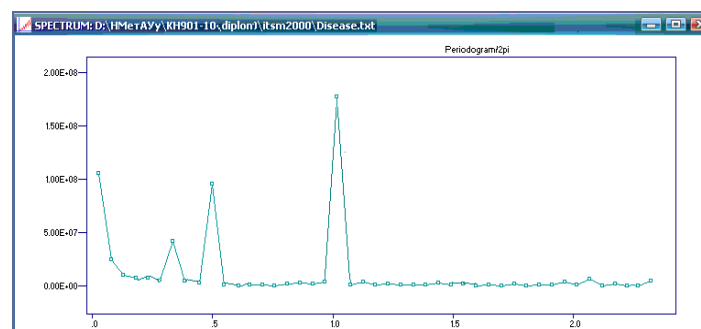


Figure 4. Periodogram in ITSM 2000

When considering time series per unit of time, one month is taken (one observation per month). On periodogram (Figure 4) on the X-axis argument corresponds to the following values: 0.25 - 3 months, 0.5 - 6 months, 1.0 - 12 months.

The presence of peaks in the range of 0.33, 0.5, and 1.0 indicates that there are three cycles in the investigated series: - 4 months ( $0.33 \cdot 12$  months = 4 months); - half-year cycle ( $0.5 \cdot 12$  months = 6 months); - annual cycle ( $1.0 \cdot 12$  months = 12 months).

The signal spectrum, obtained after processing the time series in the add-in (Figure 5), shows the presence of three clearly expressed cycles with periods of 4, 6 and 12 months. So, the spectral analysis in the add-in and in the ITSM 2000 program is identical.



Figure 5. The signal spectrum in the "add-in"

## Conclusions

The development of the add-on, which can be used to process time series in MS Excel spreadsheets, has been done. The add-in allows to perform a smoothing of the time series and perform a spectral analysis of the data. Output of results on the MS Excel sheet is provided.

The time series of the number of patients with digestive disorders has been studied. Spectral analysis revealed the presence of cyclicity in the investigated series, that is proved with numbers:

- Period = 4Td indicates a presense of three-month cycle;

- Period= 6Td indicates a presense of six-month cycle;

- Period=12Td 12Td indicates that the nature of the curve, which reflects the annual number of citizens, who applied to health facilities, is identical for all ten intervals. The obtained results are confirmed by expert evaluations.

Confirmation of functionality of the created building on in Excel was conducted by comparison of results, got at analogical treatment of the investigated row in the program ITSM 2000. Comparison of results showed their identity. It is proved that the modules of the the add-ins are working efficiently.

#### References

1. Гайдышев И.П. Решение научных и инженерных задач средствами Excel, VBA и C/C++. СПб.: БХВ – Петербург, 2004. 512 с.
2. Дорош Н. Л., Храпач Ю. О. Результати розробки надбудови MS Excel для обробки часових рядів. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 2. (97). С. 8-12.
3. Архангельский А.Я. Программирование в C++Builder 6 . М.: издательство «Бином», 2008. 1152 с.
4. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М. Мир, 1982. 428 с.
5. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения. М.:Мир, 1971. 462 с.
6. Солонина А. И., Клионский Д. М., Меркучева Т. В., Перов С. Н. Цифровая обработка сигналов и MATLAB: учеб. Пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.
7. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. М.:Бином, 2006. 656 с.
8. ITSM 2000 Professional Version 6.0, developed by Peter J. Brockwell and Richard A. Davis, B&D Enterprises, Inc., Copyright 1999.
9. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.

#### References

1. Gaydyishev I.P. Reshenie nauchnyih i inzhenernyih zadach sredstvami Excel, VBA i S/C . SPb.: BHV – Peterburg, 2004. 512 s.
2. Dorosh N. L., Khrapach Yu. O. Rezultaty rozrobky nadbudovy MS Excel dlia obrobky chasovykh riadiv. Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskiyi zbirnyk naukovykh prats. Dnipropetrovsk, 2015. Vyp. 2. (97). S. 8-12.
3. Arhangelskiy A.Ya. Programmirovaniye v S Builder 6 . M.: izdatelstvo «Binom», 2008. 1152 s.
4. Otnes R. Prikladnoy analiz vremennyih ryadov. Osnovnyie metodyi. M. Mir, 1982. 428 s.
5. Dzhenkins G. Spektralnyi analiz i ego prilozheniya. M.:Mir, 1971. 462 s.
6. Solonina A. I., Klionskiy D. M., Merkuicheva T. V., Perov S. N. Tsifrovaya obrabotka signalov i MATLAB: ucheb. Posobie. SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 512 s.
7. Layons R. Tsifrovaya obrabotka signalov. M.:Binom, 2006. 656 s.
8. ITSM 2000 Professional Version 6.0, developed by Peter J. Brockwell and Richard A. Davis, B&D Enterprises, Inc., Copyright 1999.
9. Hemming R.V. Tsifrovyye filtryi. M.: Sov. radio, 1980. 224 s.

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ФОРМЫ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ, ЗАДАНЫХ НА МНОЖЕСТВЕ РЕАЛИЗАЦИЙ

*Предложен метод определения предельных стационарных форм цифровых сигналов, заданных множеством реализаций, полученных при различных условиях их формирования. Метод базируется на модели формообразования таких сигналов в виде марковских эргодических цепей. Определение пространственных распределений интенсивностей предельных реализаций цифровых сигналов производится на основе матриц переходов (статистических операторов) между различными реализациями первичных сигналов. В качестве базовой реализации анализируемого сигнала принята обладающая максимальной энергетической энтропией. Предложенный метод является альтернативой экстраполяции данных, обеспечивая робастность оценок форм синтезированных сигналов. Метод обобщен на цифровые сигналы произвольной размерности. Установлен высокий уровень сохранения структурной схожести геометрических форм распределений интенсивности исходных и синтезированных сигналов.*

*Ключевые слова:* марковская эргодическая цепь, матрица переходов, энергетическая энтропия, индекс структурной схожести, экстраполяция.

В.М. КОРЧИНСКИЙ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### ГРАНИЧНІ ФОРМИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ, ЗАДАНИХ НА МНОЖИНІ РЕАЛІЗАЦІЙ

*Запропоновано метод визначення граничних стаціонарних форм цифрових сигналів, які задані множинами реалізацій, що отримані за різних умов їхнього формування. Метод базується на моделі формоутворення таких сигналів у вигляді марківських ергодичних ланцюгів. Визначення просторових розподілів інтенсивності граничних реалізацій цифрових сигналів здійснено на основі матриць переходів (статистичних операторів) між різними реалізаціями первинних сигналів. За базову реалізацію сигналу, що аналізується, приймається така, що має найбільшу енергетичну ентропію. Запропонований метод є альтернативою екстраполяції даних, забезпечуючи робастність оцінок форм синтезованих сигналів. Метод узагальнено на цифрові сигнали довільної вимірності. Встановлено високий рівень збереження структурної схожості геометричних форм розподілів інтенсивностей вихідних та синтезованих сигналів.*

*Ключові слова:* марківський ергодичний ланцюг, матриця переходів, енергетична ентропія, індекс структурної схожості, екстраполяція.

V.M. KORCHINSKY

Oles Honchar Dnipro National University

### LIMITING FORMS OF THE DIGITAL SIGNALS DEFINED ON SET OF REALIZATIONS

*The article is devoted to the definition of limiting forms of digital signals presented by sets of their realizations, received at various conditions of their fixing.*

*The method of definition the stationary limiting realizations of such signals is offered. The set of realizations of an analyzed digital signal is considered as the Markov ergodic chain. Statistical connection between realizations of an analyzed signal is presented by the normalized matrix of mutual transitions of one realization in another one. Statistical independence of transition matrix columns is ensured with its QR-decomposition.*

*As base realization of an analyzed signal it is accepted possessing maximum power (quadratic) informational entropy.*

*Definition of limiting implementation of an analyzed signal is reduced to replacement of a line of a matrix of transitions with individual line that provides a normalization condition, with the subsequent redesign of required implementation by transformation, the inverse to used for procedure of construction of an initial transition matrix. Variants of realization of a proposed method are offered at various levels of conditionality of a transition matrix.*

*It is shown that the offered method ensures robust estimations of the synthesized realizations of an analyzed signals.*



*The method is generalized on digital signals of arbitrary dimension. High level of preservation of structural similarity of geometrical forms of intensity distributions between the set of realizations of an initial signal and its synthesized realization.*

*Efficiency of the offered method is confirmed by results of the analysis the multispectral digital images of remote sensing, gained in various spectral intervals values of an index of structural similarity of the initial and synthesized maps, and also cards of structural similarity.*

*Results of work may be used at the thematic analysis of multidimensional digital signals of arbitrary physical nature, extrapolations of experimental data, forecasting the dynamics of non-stationary processes and pattern recognition also.*

*Keywords: Markov ergodic chain, a matrix of transitions, power entropy, index of structural similarity, extrapolation.*

### Постановка проблемы

Значительное количество приложений связано с анализом и обработкой цифровых сигналов, представленных множеством реализаций, полученных при различных условиях их фиксации. Такой характер сигналов обуславливается способом их формирования (в частности, многоспектральные цифровые изображения дистанционного зондирования, представленные в растровых форматах). Существенное влияние на возможности обнаружения, анализа и оценки параметров таких сигналов оказывает наличие помех (шумов), неизбежно присутствующих при формировании и передаче сигналов, множество реализаций которых определяет их многомерный характер.

Вопросам анализа и тематической интерпретации цифровых сигналов посвящено значительное количество работ как теоретического, так и прикладного характера. Соответствующие результаты ограничены анализом отдельных реализаций сигналов без учета их задания на множестве реализаций. Поэтому представляет интерес развитие общей методики анализа таких сигналов (независимо от их размерности) и на этой основе – прогнозирования их устойчивых предельных распределений.

### Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время основным методом анализа предельных реализаций цифровых сигналов, заданных на множествах своих реализаций, является регрессионный анализ [1, 2]. Возможности такого подхода к прогнозированию предельных реализаций ограничены использованием линейной связи множества реализаций анализируемого сигнала с искомой предельной реализацией либо связей, сводящихся к линейной.

Среди иных методов определения предельных реализаций цифровых сигналов отметим базирующиеся на вейвлет-технологиях обработки цифровых сигналов технологии [3]. Данные методы в существующей форме обеспечивают "расширение" сигналов (signal extension) лишь по одной их реализации.

### Цель исследования

Цель статьи – разработка метода увеличения информационной значимости (разрешающей способности) многомерных цифровых сигналов, заданных на ортогональных целочисленных решетках, посредством совмещения информационных характеристик их реализаций, представленных слоями решеток.

### Изложение основного материала исследования

Рассматривается множество  $\left\{ \mu_n^{(k)} \mid n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K} \right\}$ , включающее  $K$  реализаций цифрового сигнала, заданных на  $N$  отсчетах и принимающих целочисленные значения из интервала  $[0, M - 1]$ . Представим это множество матрицей  $\mathbf{W}_{N \times K}$ , являющейся конкатенацией  $K$  векторов  $\mathbf{Z}_{N \times 1}^{(1)}, \mathbf{Z}_{N \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{Z}_{N \times 1}^{(K)}$  по столбцам, которые интерпретируем как реализации сигнала, полученные при его различных измерениях (условиях фиксации). Вследствие независимости фиксации этих реализаций рассматриваем множество векторов  $\mathbf{Z}_{N \times j}^{(i)}, i = \overline{1, K}, j = \overline{1, K}$ , как конечную эргодическую цепь Маркова, для которой, как известно, существуют предельные стационарные состояния [4].

Сформируем матрицу переходов между различными реализациями сигнала:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,K} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{K,1} & p_{K,2} & \dots & p_{K,K} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $p_{i,j}$  – вероятности перехода сигнала из состояния  $i$  в состояние  $j$  при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^K p_{i,j} = 1 \text{ для всех } i. \quad (2)$$

Значения матричных элементов  $p_{i,j}$  определим соотношением:

$$p_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_{k=1}^K n_{i,k}} \text{ при } i, j = \overline{1, K}, \quad (3)$$

где  $n_{i,j}$  – количество совпадающих отсчетов  $i$ -й и  $j$ -й реализаций сигнала.

Заметим, что такое определение элементов матрицы  $\mathbf{P}$  обеспечивает выполнение условия (2).

Как известно, для эргодических цепей Маркова существует стационарное предельное состояние [2]. Для его определения необходимо решение уравнения:

$$\mathbf{q} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{q}. \quad (4)$$

Возможны следующие варианты определения вектора  $\mathbf{q}$ .

- 1) Матрица  $\mathbf{P}$  – хорошо обусловлена. При этом необходимо задание "начального" значения искомого вектора  $\mathbf{q}$ , в качестве которого примем строку  $k$  матрицы переходов  $\mathbf{P}$ , представляющую наиболее информативную реализацию цифрового сигнала, обладающую максимальной энергетической энтропией [5]. Далее формируется модифицированная матрица переходов посредством замены указанной строки вектором-строкой с компонентами  $v_{i,k} = \delta_{ik}$ , где  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера ( $i = \overline{1, Z}$ ). Матричное уравнение для определения вектора  $\mathbf{q}$  при этом приобретает вид:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{b}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{b}$  – вектор-столбец с компонентами  $b_i = \delta_{ik}$ ,  $i = \overline{1, Z}$ .

- 2) Матрица  $\mathbf{P}$  – плохо обусловлена. В этом случае необходимо ввести дополнительное нормирующее условие посредством дополнения матрицы переходов единичной строкой, что обеспечивает выполнение условия (2). Матричное уравнение для определения вектора  $\mathbf{q}$  при этом приобретает вид:

$$\bar{\mathbf{P}} \cdot \mathbf{q} = \bar{\mathbf{b}}, \quad (6)$$

где  $\bar{\mathbf{P}}$  – модифицированная указанным образом матрицы переходов, где  $\bar{\mathbf{b}}$  – вектор-столбец с компонентами  $\bar{b}_i = \delta_{ik}$ , где  $k$  – номер добавленной единичной строки,  $i = \overline{1, Z}$ .

Решение сформированной указанным образом переопределенной системы линейных уравнений может быть получено методом Мура-Пенроуза, который минимизирует норму  $\|\bar{\mathbf{P}} \cdot \mathbf{q} - \bar{\mathbf{b}}\|$  [6].

В обоих случаях реконструкция предельного распределения отсчетов анализируемого сигнала производится преобразованием, обратным к (3).

Изложенный метод может быть легко обобщен на цифровые сигналы произвольной размерности с использованием результатов работы [7], в которой предложен метод редукции размерности многомерных цифровых сигналов.

Ниже приведен пример реализации предложенного метода применительно к многоспектральным растровым изображениям дистанционного зондирования. На рис. 1–6 представлены первичные растровые изображения, зафиксированные одновременно в шести спектральных каналах излучения – носителя видовой информации, которые рассматриваем как реализации анализируемого многомерного цифрового сигнала.



Рис. 1. Изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.



Рис. 2. Изображение спектрального канала 0.63 мкм – 0.69 мкм.

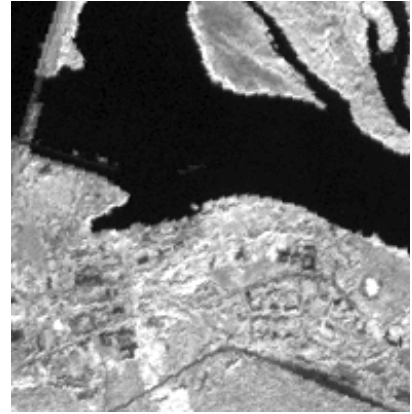


Рис. 3. Изображение спектрального канала 0.78 мкм – 0.86 мкм.

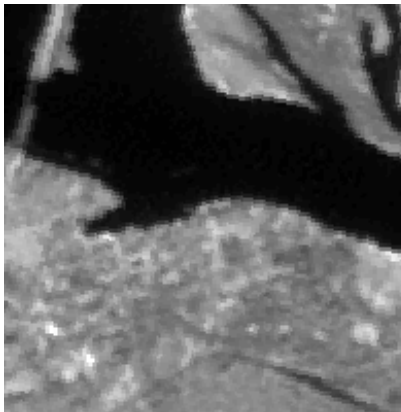


Рис. 4. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.



Рис. 5. Изображение спектрального канала 2.295 мкм – 2.365 мкм.

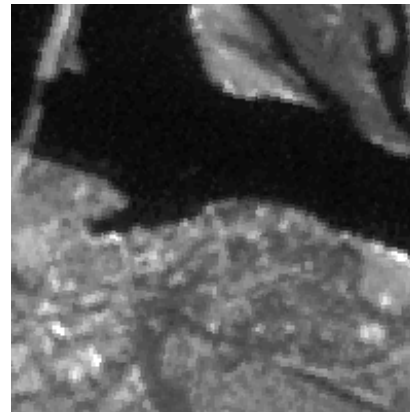


Рис. 6. Изображение спектрального канала 2.360 мкм – 2.430 мкм.

Значения соответствующих энергетических энтропий приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Энтропия,<br>бит | Изображения |        |        |        |        |        |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Рис. 1      | Рис. 2 | Рис. 3 | Рис. 4 | Рис. 5 | Рис. 6 |
|                  | 5.2127      | 5.0112 | 4.8237 | 4.6966 | 4.5803 | 4.3792 |

Как следует из данных табл. 1, наибольшей информативностью обладает изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм, которое принимаем в качестве базовой реализации.

На рис. 7 представлена предельная реализация анализируемого многомерного сигнала, полученная по его реализациям, приведенным на рис. 1–6. Для сравнения на рис. 8 представлено соответствующее растровое изображение, зафиксированное в спектральном интервале 2.360 мкм – 2.430 мкм.

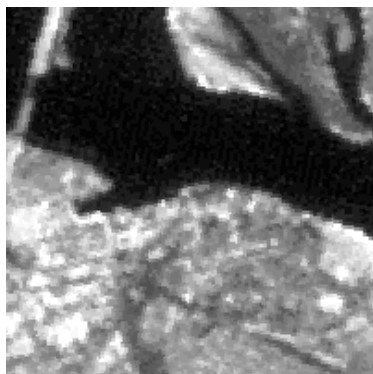


Рис. 7. Предельна реализация анализируемого изображения.

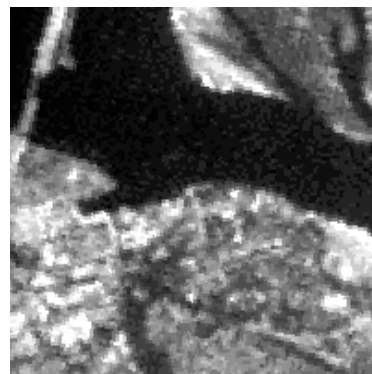


Рис. 8. Изображение канала 2.360 мкм – 2.430 мкм.

Высокая степень схожести изображений, приведенных на рис. 7–8, подтверждается значением индекса их структурной схожести, определенного по методике работы [8], который в данном случае равен 0.8421.

#### Выводы

В работе предложен новый эффективный метод определения предельных стационарных форм цифровых сигналов произвольной размерности и физической природы, заданных на множествах реализаций, полученных при различных условиях формирования анализируемых сигналов. Метод является альтернативой экстраполяции данных, обеспечивая робастность оценок форм синтезированных реализаций сигналов. Также предложенный метод обеспечивает высокий уровень сохранения структурной схожести этих реализаций.

#### Список использованной литературы

1. Даджион Р., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов / пер. с англ. под ред. Л.П. Ярославского. Москва: Мир, 1988. 488 с.
2. Мыльник В.В., Титаренко Б.П., Воловченко В.А. Исследование систем управления. Москва: Академический Проект, 2003. 352 с.
3. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. Москва: Солон-Р, 2010. 400 с.
4. Medhi J. Stochastic Models in Queuing Theory. Amsterdam, Boston: Academic Press, 2003. 450 p.
5. Габидулин Э.М., Пилипчук Н.И. Лекции по теории информации. Москва: МФТИ, 2007. 214 с.
6. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore: Cambridge University Press, 2007. P. 69–73.
7. Корчинский В.М. Многомерное векторное представление распределений яркости многоспектральных растровых изображений дистанционного зондирования Земли. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2014. № 3 (50). С. 90–93.
8. Wang Z., Bovik A.K., Sheikh H.R., Simoncelli E.R. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612.

#### References

1. Dadzhion, R., & Mersero, R. (1988) Tsifrovaya obrabotka mnogomernyih signalov / per. s angl. pod red. L.P. Yaroslavskogo, Moskva: Mir.
2. Myilnik, V. V., Titarenko, B. P., & Volovchenko V. A. (2003) Issledvanie sistem upravleniya. Moskva: Akademicheskij Proekt.
3. Dyakonov, V. P. Veyvletyi. (2010) Ot teorii k praktike. Moskva: Solon-R.
4. Medhi, J. (2003) Stochastic Models in Queuing Theory. Amsterdam, Boston: Academic Press.
5. Gabidulin, E. M., & Pilipchuk, N. I. (2007) Lektsii po teorii informatsii. Moskva: MFTI.
6. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007) Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore: Cambridge University Press. P. 69–73.
7. Korchinskiy, V. M. (2014) Mnogomernoe vektornoe predstavlenie raspredeleniy yarkosti mnogospetralnyih rastrovyyih izobrazheniy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnikeskogo universiteta*. 3 (50), 90–93.
8. Wang, Z., Bovik, A. K., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. R. (2004) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 13, 4, 600–612.

УДК 621.397

О.В. ОШАРОВСЬКА

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

І.В. ОШАРОВСЬКИЙ, Н.П. ГУРЧЕНКО

Одеський національний політехнічний університет

### ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ЩІЛЬНИХ УПАКОВОК ПРИ ФОРМУВАННІ ЗОБРАЖЕНЬ

*В роботі розглянуті питання формування цифрового зображення з точки зору щільних упаковок, замоцнення та сіток. Наведено показники кількості вершин для замоцнення об'єктів зображення адаптивної не еквідистантною сіткою і швидкості цифрових потоків що досягаються. Розглянуто варіанти замоцнення зображення прямокутниками різного розміру при фрактальному кодуванні і дана оцінка часу, що витрачається на кодування. Порушені питання заповнення прямокутного контейнера колами з випадковими значеннями радіусів для формування тестових зображень спеціальної форми.*

*Ключові слова:* цифрове зображення, замоцнення, щільне пакування, сітка, фрактальне кодування.

Е.В. ОШАРОВСКАЯ,

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

И.В. ОШАРОВСКИЙ, Н.П. ГУРЧЕНКО

Одесский национальный политехнический университет

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПЛОТНЫХ УПАКОВОК ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*В работе рассмотрены вопросы формирования цифрового изображения с точки зрения плотных упаковок, замоцнения и сеток. Приведены показатели количества вершин для замоцнения объектов изображения адаптивной не эквидистантной сеткой и достигаемые скорости цифровых потоков. Рассмотрены варианты замоцнения изображения прямоугольниками разного размера при фрактальном кодировании и дана оценка времени, затрачиваемом на кодирование. Затронуты вопросы заполнения прямоугольного контейнера окружностями со случайными значениями радиусов для формирования тестовых изображений специальной формы.*

*Ключевые слова:* цифровое изображение, замоцнение, плотная упаковка, сетка, фрактал.

O.V. OSHAROVSKA,

O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications

I.V. OSHAROVSKIYI, N.P. GURCHENKO

Odessa national polytechnic university

### USING THE THEORY OF DENSE PACKING IN THE FORMATION OF IMAGES

*The paper deals with the formation of a digital image from the point of view of dense packages, paving and nets. In the image recognition area, there are such parameters as signs, contours, special points, and adjacent elements. In this case, other mathematical models that use varieties, equidistance, and non-equidistant meshes already describe the image. In these cases, it is no longer possible to speak of a sequential scan on the pixel lines to create an image, and they form elements that may be described by the Voronoi cells. In this paper, we will dwell on the representation of images by object-oriented methods based on Voronoi cells and the Delaunay triangulation. Packing with a triangular grid is dense, however, from the point of view of transmission over the communication channels, the amount of information increases compared with the transmission with standard packaging by rectangular cells and sequential sweep. Indicators of the number of vertices for the tiling of image objects with an adaptive non-equidistant grid and reachable speeds of digital streams are given. In addition to three-dimensional coordinates, each vertex contains information about the color represented in the RGB space; the cloud of points in space specifies the discrete form of the original object; each image corresponds to an associated tensor. In the process of processing and encoding, there is a reduction of vertices and a change in the connectivity of the grids. When resuming an increase in resolution, interpolation of new vertices is achieved. The variants of image piling by rectangles of different sizes with fractal coding are considered and the time spent on coding is estimated. The advantage of a fractal image representation is the ability to adjust the resolution to an accuracy of up to a quarter of the image element, with a dense package. A*



*disadvantage today is the high computational cost and encoding time. The issues of filling a rectangular container with circles with random values of the radii for the formation of test images of a special form. We have developed a software package, which in a circle-type container encloses circles of smaller radii, varying by chance law. As it can be seen from results, the density of the packaging is close to one.*

*Key words: digital image, tiling, dense packing, mesh, fractal coding.*

### Постановка проблеми

Цифрові зображення за своєю природою можуть бути представлені як щільна упаковка або мозаїка, що покриває всю площину прямокутної області, в межах якої і відображається зображення. Натурне зображення в процесі зйомки розбивається на елементи зображення, пікселі, які при спрощеному варіанті передбачаються всі однакового розміру прямокутної форми. Кожен елемент зображення характеризується яскравістю і трьома позитивними значеннями, що описують колір, зазвичай задаються червоний зелений і синій складові кольору для електронних зображень. Математична модель електронного зображення являє собою чотири матриці однакових розмірів, або правильніше було б описати зображення тензором. Тоді кожен елемент зображення отримує свою прописку, а саме, номер рядка, номер стовпця і номер матриці. З алгебраїчної точки зору ми отримуємо компактну і зрозумілу форму записи. Але, з точки зору передавання інформації про цифрові зображення, особливо рухомих, як в телебаченні високої роздільної здатності, світ зіткнувся з проблемою «великих даних», терабітних потоків, з якими не справляються телекомунікаційні мережі передачі даних [1, 2, 3]. За останні півстоліття запропоновано величезна кількість алгоритмів стиснення зображень, спрямованих на скорочення потоку даних [3, 4]. В кінцевому підсумку, на приймальній стороні необхідно відтворити «безперервне» або щільно упаковане пікселями зображення.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання ефективної щільної упаковки пікселів зображення має сенс розглядати з точки зору і розпізнавання зображень. В області розпізнавання зображень існують такі параметри як ознаки, контури, особливі точки, суміжні і сусідні елементи. У такому випадку зображення описується вже іншими математичними моделями, в яких використовуються різноманіття, еквідистантність і не еквідистантність сітки. У цих випадках вже не можна говорити про послідовну розгортку по рядках пікселів для створення зображення, а утворюють елементи які можуть бути описані комірками Вороного. У даній роботі зупинимося на представленні зображень об'єктно орієнтованими методами на основі комірок Вороного і триангуляції Делоне. Метод перспективний, особливо для опису об'ємних зображень.

Другим перспективним методом, з точки зору стиснення зображень з різною детальністю, є фрактальний метод, коли зображення упаковується або проводиться замощення паркетом, але розміри осередків різні. Також розглянемо варіант створення кольорового зображення мозаїчного типу що складається з кіл різного діаметру.

Всі три варіанти вимагають значних обчислювальних витрат, але мають багатообіцяючі перспективи досягнення великих коефіцієнтів стиснення при можливості заповнення областей з високою чіткістю.

### Мета дослідження

Метою моделювання є порівняння варіантів щільної упаковки елементів зображення, зокрема, використання триангуляції Делоне для створення полігонально-сіткового зображення або фрактального модифікованого алгоритму, який дозволяє виконувати заповнення зображення доменними і ранговими блоками різних розмірів, обмежити пороговими методами частину коефіцієнтів, але при цьому не привести до помітного розмиття дрібних деталей зображення. Моделювання обробки зображення здійснюється в середовищі Matlab і на Simulink.

Поставлено завдання вибрати і обґрунтувати критерії вибору компонент, що забезпечують найкраще суб'єктивну якість передачі кордонів зображення і дрібно структурних текстур, побудувати математичну модель формування коефіцієнтів і провести чисельне рішення щільної упаковки осередками Вороного, для різних розмірів блоків сегментації зображення.

У цій роботі основна увага приділяється проблемі вибору порогового рівня на основі компромісу між досяжним ступенем стиснення і можливістю збереження текстури зображення і наводяться відповідні оцінки.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Замощення є покриття всієї площини фігурами що не перекриваються. Замощення можна трактувати як розбиття площини або простору на фігури без спільних внутрішніх точок. Замощення площини можна представити у вигляді набору склеєних по межах фігур. Один з найпростіших прикладів - так зване гексагональне замощення, коли площину, як стільники, складають з шестикутників, з'єднаних по сторонам. Замощення називається періодичним, якщо при зсуві на деякий вектор воно переходить в себе. У гексагональному випадку це, наприклад, вектор, що з'єднує центри сусідніх шестикутних осередків. Уже піфагорійцям було відомо, що є тільки три види правильних багатокутників, якими можна повністю замостити площину без пробілів і перекриттів, - трикутник, квадрат і шестикутник.

Математична проблема неперіодичного замощення площини існує вже близько півстоліття. Найвідоміше рішення цієї проблеми це мозаїка Пенроуза, яка з'явилася в сімдесятих роках минулого століття, і в якій використовується всього дві різні фігури.

Моріс Ешер цікавився всіма видами мозаїк як регулярними так і нерегулярними (періодичними і квазіперіодичними), а також ввів власний вид, який назвав «метаморфозами», де фігури змінюються і взаємодіють одна з одною, а іноді змінюють і саму площину.

Деякі визначення паркету не обмежуються багатокутниками; в цьому випадку паркетом називається покриття площини без пропусків і перекриттів заданими фігурами (в окремому випадку – багатогольниками, правильними чи неправильними, опуклими або неопуклими). У такому випадку навіть для паркету з багатокутників може не дотримуватися вимога "два багатокутника повинні мати загальну вершину, загальну сторону або зовсім не мати спільних точок", крім того, з'являється безліч різноманітних паркетів, що складаються не з багатокутників, а з криволінійних фігур.

Георгій Феодосійович Вороний встиг написати кілька фундаментальних робіт по геометрії позитивних квадратичних форм і теорії паралелодрів, в яких були вирішені принципові завдання з теорії покриттів, упаковок і розбиття. Ці роботи визначили напрямок досліджень на століття вперед. Згодом роботи Вороного зробили серйозний вплив на дослідження Бориса Миколайовича Делоне. Георгій Вороний «одягнув» свою виключно геометричну по ідеї роботу про паралелодрі в «аналітичні одяжки». На противагу цій традиції, Делоне, володіючи безсумнівним геометричним даром, протягом багатьох років займався геометризацией кількох важливих алгебраїчних робіт, включаючи алгоритм Вороного для обчислення основної одиниці в кільці, відповідної кубічної форми негативного дискримінанту.

У роботі розглянуто варіант створення тривимірних сіткових об'єктів із зображень натурних сцен. Зображення містить як ділянки з плавним зміною яскравості і кольоровості, так і ділянки великої детальності. Для розбиття сцени на ділянки з різною детальністю використовувався градієнтний метод. За визначенням, градієнт зображення  $f(x, y)$  в точці  $(x, y)$  - це вектор (1):

$$\nabla f = \left[ \begin{matrix} G_x \\ G_y \end{matrix} \right], \quad (1)$$

де  $G_x = \partial f / \partial x$  є приватна похідна по осі  $x$ , та  $G_y = \partial f / \partial y$  є приватна похідна по осі  $y$ ; модуль (2) цього вектору:

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

Проведено порівняння по створюваному цифровому потоку при поданні складової яскравості вершинами еквідистантної рівномірної сітки та адаптивною нееквідистантною сіткою. Для випадку адаптивної сітки використовується триангуляція Делоне по граничним значенням модуля градієнта [5]. Показано, що вираш в стисненні сигналу яскравості адаптивної сіткою зростає при кодуванні зображень високої і надвисокої чіткості. На рис. 1 наведено тестове зображення дельфінів в море. Градієнтними методами виділені контури об'єктів в тестовому зображенні (Рис. 2).

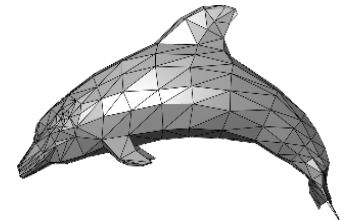
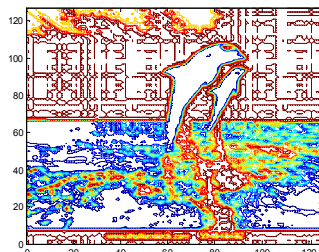


Рисунок 1 - Тестове зображення

Рисунок 2 – Контур зображення

Рисунок 3 - Триангуляція дельфіна

Окремий об'єкт дельфін, підданий триангуляції, представлений на рис.3. На дельфіні видно, що сітка з однаковим кроком, рівномірна. В області очей і рота немає можливості показати дрібні деталі.

Упаковка трикутної сіткою є щільною, однак, з точки зору передачі по каналах зв'язку, обсяг інформації зростає в порівнянні з передачею при стандартній упаковки прямокутними осередками і послідовної розгортці. Приймаємо в якості вхідних даних полігональне-сіткові моделі 3D-об'єктів, які є набором трикутників в 3D-просторі. Сітка складається з безлічі вершин, ребр і поверхонь [5]. Крім тривимірних координат кожна вершина містить інформацію про колір, представлену в просторі RGB; хмара точок в просторі задає дискретно форму вихідного об'єкта; кожного зображення відповідає асоційований тензор. В процесі обробки і кодування відбувається проріджування вершин і зміна зв'язності сіток. При відновленні збільшення роздільної здатності досягається інтерполяцією нових вершин. [6].

Розглянемо залежність числа вершин сітки від вибору градієнтних порогових кроків. У таблиці 1, 2 наведені залежності для зображення найнижчої роздільної здатності, що отримане в результаті витончення з інтерполяцією вихідного зображення до розміру 128 на 128 пікселів. Позначимо число вершин для однорідної сітки як T1, а для нерівномірної сітки - T2.

Таблиця - 1. Залежність числа вершин сітки T1 від порогу градієнту щодо розміру зображення.

| Вершин рівномірної сітки | Розмір зображення 128 x 128 | Розмір зображення 256 x 256 | Розмір зображення 512 x 512 | Розмір зображення 1024 x 1024 |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| T1                       | 32 258                      | 130 050                     | 522 242                     | 2 093 080                     |

Таблиця - 2. Залежність числа вершин сітки T2 від порогу градієнту щодо зображення

| Крок градієнта | Розмір зображення 128 x 128 | Розмір зображення 256 x 256 | Розмір зображення 512 x 512 | Розмір зображення 1024 x 1024 |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 0.1            | 3 256 800                   | 13 107 200                  | 52 428 800                  | 211 226 044                   |
| 0.25           | 524 228                     | 2 097 152                   | 8 328 608                   | 33 554 438                    |
| 0.5            | 232 562                     | 524 288                     | 2 097 152                   | 8 328 608                     |
| 0.75           | 131 072                     | 232 562                     | 930 248                     | 3 726 450                     |
| 1              | 57 800                      | 131 072                     | 524 288                     | 2 097 152                     |

Наприклад, в області рівновіддаленої сітки, де градієнт залишається практично незмінним, 373 трикутників залишилися для опису об'єктів зображення з поступовою зміною градієнта зображення. Більш того, в нееквідистантній сітці, де відбуваються стрибки яскравості, потрібно було 6275 трикутників, мінімальний розмір трикутника з 3 елементів зображення і максимальний трикутник з 126 елементів зображення.

Оцінюємо цифровий потік сигналу яскравості при стандартному прогресивному скануванні вихідного зображення. Виходячи з розміру зображення  $M \times N$  ультрависокої чіткості, прогресивної розгортки з кількістю кадрів у секунду  $n$ , візьмемо біт цифрового сигналу яскравості, рівний 10. Тоді верхня частота відсічення може бути визначена за формулою (3)

$$f_{max} = M \times N \times n / 2. \quad (3)$$

Можна припустити, що число вершин  $V$  приблизно вдвічі більші за трикутники  $T$ . У нашому прикладі мінімальна розмірність сторони трикутника є двома елементами розкладання, і ми можемо обмежитися кодом для дванадцяти цифр для вершини для всіх трьох координат. У цьому випадку грубу оцінку цифрового потоку можна представити формулою (4) і результати звести у таблиці 3.

$$V_{\Sigma} = V_{sm} + V_{det} = [3 \times m \times n \times 2 \times (T_{sm} + T_{det})] \quad (4)$$

$V_{sm}$  швидкість передачі бітів для полігонів на плоских ділянках;

$V_{det}$  швидкість передачі бітів для полігонів в районах, де дуже детально.

Як видно з таблиць 3 швидкості цифрового потоку при поданні об'єктів зображення сіткових методів дуже висока і вимагає застосування ефективних алгоритмів стиснення. На приймальній стороні при синтезі зображення необхідна інформація не тільки про координати трикутників, а й про їх топологічний зв'язок один з одним. Зображення при синтезі являє собою приклад щільної упаковки, крім кордонів об'єкта.

Таблиця - 3. Залежність швидкості цифрового потоку від розміру зображення

| Розмір зображення | Швидкість цифрового потоку, Мбіт / с |
|-------------------|--------------------------------------|
| 128 x 128         | 0,38                                 |
| 256 x 256         | 0,38                                 |
| 512 x 512         | 1,50                                 |
| 1024 x 1024       | 6,00                                 |
| 2048 x 2048       | 18,76                                |
| 4096 x 4096       | 23,93                                |

Іншим цікавим прикладом щільної упаковки зображення є фрактальне кодування і декодування кольорових зображень [7]. У процесі кодування інформація про блоки нащадків передається тільки у вигляді їх адреси, що дозволяє значно стиснути цифровий потік. Чим більше відстань між векторами параметрів, ми дозволяємо, тим вище ступінь стиснення може бути отримана. Тестові зображення "Барбара", "Перець" і "Баварія", які розбиті на рангові блоки, наведені на рис. 4. Для різних типів зображень суб'єктивна якість відновлених зображень буде різною.

При синтезі рангові блоки будуть різних розмірів і з'являються в часі майже в хаотичному порядку. Перевагою фрактального представлення зображення є можливість регулювати чіткість з точністю до чверті елемента зображення, при щільній упаковці. Недоліком на сьогоднішній день виявляється великі обчислювальні витрати і час кодування (табл. 4).

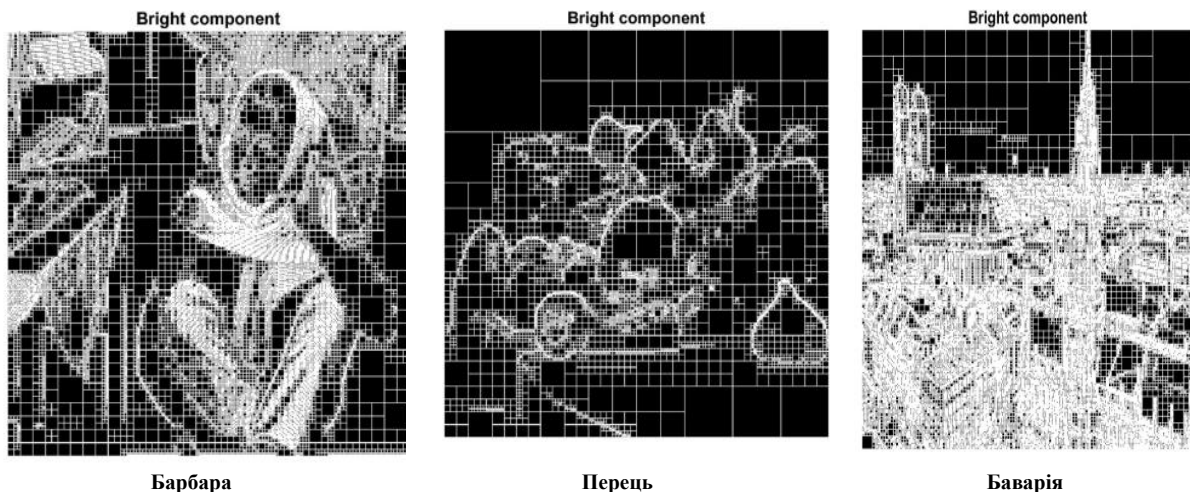


Рисунок 4 Тестові зображення які розбиті на рангові блоки

Таблиця - 4. Параметри фрактального кодування зображень

| Параметри                   | Зображення |         |         |
|-----------------------------|------------|---------|---------|
|                             | Перець     | Барбара | Баварія |
| Кількість блоків домену     | 225        | 841     | 347     |
| Кількість ранжованих блоків | 517        | 1504    | 2243    |
| Допустима помилка           | 0.05       | 0.05    | 0.05    |
| Середня помилка пікселів, % | 1.79       | 1.92    | 1.84    |
| Коефіцієнт стиснення        | 47.35      | 51.68   | 49.26   |
| Час кодування, с            | 0.0187     | 0.0286  | 0.0214  |
| Час декодування, с          | 0.0091     | 0.0062  | 0.0073  |

У двовірному евклідовому просторі Джозеф Луї Лагранж довів ще у 1773 році, що решітчасте розташування кіл з найбільш щільною площиною є гексагональним пристроєм упаковки, [7] в якому центри кіл розташовані в гексагональній решітці (шахові ряди, як у стільнику), і кожне коло оточене шістьма іншими колами. Щільність  $\eta_h$  цієї композиції (5):

$$\eta_h = \frac{\pi\sqrt{3}}{6} \approx 0,9069, \quad (5)$$

Пізніше, Axel Thue дав перший доказ того, що це було оптимальним в 1890 році, показуючи, що шестикутна решітка щільна щодо всіх можливих насадок окружності, як регулярних і нерегулярних. Проте, деякі його докази вважалися неповними. Є одинадцять ущільнень круга на основі одинадцяти рівномірних нахилів площини. [8] У цих упаковках кожне коло можна відобразити в будь-яке інше коло шляхом відображення і обертання. Шестикутні зазори можуть бути заповнені одним колом, а додекагональні зазори можуть бути заповнені 7 колами, створюючи 3-рівномірну упаковку. Урізану трихексагональну плитку з обома типами зазорів можна заповнити як 4-рівномірну упаковку. Гексагональна плитка має два дзеркальних форми. Упаковка кіл в простих обмежених формах є поширеним типом проблеми в рекреаційній математики. Вплив стінок контейнерів важливий, і гексагональна упаковка зазвичай не є оптимальною для невеликої кількості кіл. Існує також ряд проблем, які дозволяють розміри кіл бути нерівномірними. Одне з таких розширень знайти максимально можливу щільність системи з двома конкретними розмірами кола (двійковою системою). Лише дев'ять радіусів дозволяють компактну упаковку, коли кожна пара контактів знаходиться у взаємному контакті з двома іншими колами (коли відрізки лінії тягнуться від контакту з центром кола до центру кола, вони



триангулюють поверхню). Для семи з цих співвідношень радіусу відомо, що компактна упаковка досягає максимально можливої фракції упаковки (вище, ніж у дисків з рівномірним розміром) для сумішей дисків з таким співвідношенням радіуса. Всі дев'ять мають специфічні пакети, більш щільні, ніж однорідна трикутна упаковка, як і деякі радіусні співвідношення без компактних ущільнень [9]. Теорема про упаковку кола (також відома як теорема Кебе – Андрєєва – Терстона) описує можливі зв'язки між кругами в площині, внутрішні області яких не перетинаються.

Нами був розроблений програмний комплекс, який в контейнер типу кола вписує окружності менших радіусів, мінливих за випадковим законом. Як видно з Рис. 5 щільність упаковки наближається до одиниці.

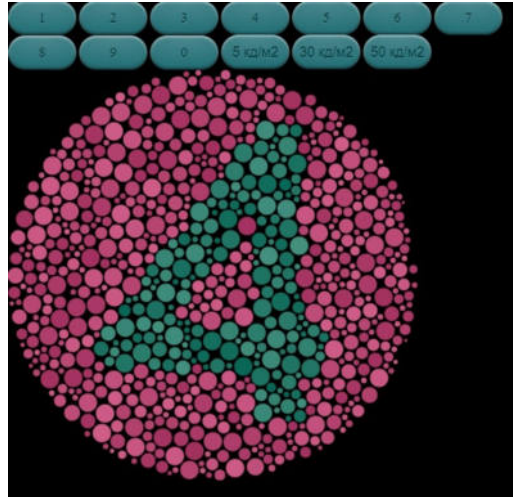


Рисунок 5 Упаковка колами з випадковими радіусами

### Висновки

В роботі проведено теоретичний аналіз і моделювання процесу створення зображень шляхом щільних упаковок. Сформульовано критерії вибору елементів паркету, що заповнюють об'єкти. Запропоновано програмна модель формування фрактального кодування зображень, заповнення виділеного градієнтним методом об'єкта трикутної сіткою. Отримано результати моделювання спеціального виду поліхроматичних таблиць на базі заповнення контейнера колами зі випадково обраними радіусами.

### Список використаної літератури

1. Blackledge M. Digital Image Processing: Mathematical and Computational Methods, Harwood, England, 2005, 783p.
2. Recommendation ITU-T J.246:2008, Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference.
3. Recommendation ITU-T J.247: 2008, Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference.
4. International Standard ISO/IEC 15444-1 :2016 | Recommendation ITU-T T.800 :2015 / Recommendation ITU-T T.800: 2015, Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system
5. Murat A. Tecalp. Two-Dimensional Mesh-Based Visual-Object Representation for Interactive Synthetic / Natural Digital Video. Proceedings of the IEEE vol. 86, No 6, June 1998, pp. 1029 – 1051.
6. Mamou K., Stefanoski N., Kirchhoffer H., Muller K., Zaharia T., Preteux F., Marpe D., Ostermann J. The New MPEG-4/FAMC Standard For Animated 3D Mesh Compression // 3DTV-CON'08, May 28-30, 2008, Istanbul, Turkey. pp. 97-100
7. Welstead S. Fractal and Wavelet Image Compression Techniques, SPIE, 1999, – 254 p.
8. Thomas Fernique, Amir Hashemi, Olga Sizova Compact packings of the plane with three sizes of discs August 2018 International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery\_ DGCI 2019: pp 420-431
9. Zimmerman, P., et al.: Calcul Mathématique avec Sage. Create Space Independent Publishing Platform, 2013, 716 p.



**References**

1. M Blackledge "Digital Image Processing: Mathematical and Computational Methods," Harwood, England, 2005, 783 p.
2. Recommendation ITU-T J.246:2008, Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference.
3. Recommendation ITU-T J.247: 2008, Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference.
4. International Standard ISO/IEC 15444-1 :2016 | Recommendation ITU-T T.800 :2015 / Recommendation ITU-T T.800: 2015, Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system
5. A. Murat Tecalp and all. "Two-Dimensional Mesh-Based Visual-Object Representation for Interactive Synthetic / Natural Digital Video." Proceedings of the IEEE, Vol 86, No 6, June 1998, pp. 1029 – 1051.
6. K. Mamou, N. Stefanoski, H. Kirchhoffer K. Muller, T. Zaharia, F. Preteux, D. Marpe, J. Ostermann The New MPEG-4/FAMC Standard For Animated 3D Mesh Compression // 3DTV-CON'08, May 28-30, 2008, Istanbul, Turkey. pp. 97-100
7. S. Welstead "Fractal and Wavelet Image Compression Techniques," SPIE, 1999, – 254 p.
8. Thomas Fernique, Amir Hashemi, Olga Sizova Compact packings of the plane with three sizes of discs August 2018 International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery\_ DGCI 2019: pp 420-431
9. Zimmerman, P., et al. "Calcul Mathématique avec Sage." Create Space Independent Publishing Platform, 2013, 716 p.

УДК 519.246.85

О.В. ПОЛИВОДА, А.В. РУДАКОВА, И.Ю. КОНДРАТЬЕВА

Херсонский национальный технический университет

### АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*В статье выполнен анализ акустического шума, полученного в результате эксперимента при работе электромеханического оборудования на основе использования современных методов цифровой обработки временных рядов в реальном времени. На первом этапе обработки сигналы пропущены через фильтр низких частот и полосовой фильтр. Исследованы спектры амплитуд сигналов до и после фильтрации, а также динамика сигналов в фазовом пространстве. Для сигналов до и после обработки рассчитаны авторегрессионные модели скользящего среднего.*

*Ключевые слова:* акустический шум, временные ряды, авторегрессия, скользящее среднее, фазовое пространство.

О.В. ПОЛИВОДА, Г.В. РУДАКОВА, І.Ю. КОНДРАТЬЄВА

Херсонський національний технічний університет

### АНАЛІЗ АКУСТИЧНОГО ШУМУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ У ФАЗОВОМУ ПРОСТОРІ

*У статті виконано аналіз акустичного шуму, отриманого в результаті експерименту при роботі електромеханічного обладнання на основі використання сучасних методів цифрової обробки часових рядів в реальному часі. На першому етапі обробки сигнали пропущені через фільтр низьких частот і смуговий фільтр. Досліджено спектри амплітуд сигналів до і після фільтрації, а також динаміка сигналів в фазовому просторі. Для сигналів до і після обробки розраховані авторегресійні моделі ковзного середнього.*

*Ключові слова:* акустичний шум, часові ряди, авторегресія, ковзне середнє, фазовий простір.

O.V. POLYVODA, H.V. RUDAKOVA, I.U. KONDRATIEVA

Kherson National Technical University

### ANALYSIS OF ELECTRIC EQUIPMENT ACOUSTIC NOISE IN PHASE SPACE

*An effective means of preventing accidents, identifying critical operating modes, and diagnosing equipment failures of electromechanical systems are the methods of functional diagnostics. A number of problems of diagnostics of electromechanical complexes at the present time can be realized by acoustic methods, by analyzing the signals received from working assemblies. The actual scientific task is the formation of a procedure for analyzing acoustic signals generated by working equipment of electromechanical complexes, based on the use of modern methods of digital time series processing in real time. Noises from equipment and machines also characterize both the general properties of systems and the properties of their parts. The experience of using acoustic methods shows that, in a state of normal functioning, the noise energy is mainly concentrated in the low-frequency region, and the energy corresponding to defects is located at higher frequencies. This circumstance is used for the timely detection of nascent violations. The article analyzes the acoustic signals obtained as a result of an experiment when operating electromechanical equipment. At the first stage of processing, the signals are passed through a low-pass filter and a band-pass filter. The spectra of the amplitudes of the signals before and after filtering, as well as the dynamics of signals in the phase space, are studied. For signals before and after processing, the autoregressive moving average models were calculated. The application of the procedure for analyzing acoustic signals and standard methods for their digital processing will allow real-time decision-making support systems to be implemented with automatic detection (diagnosis at the rate of measurement of diagnostic signals) of machinery equipment malfunctions, their degree of danger and the formation of a list of compensating measures.*

*Keywords:* acoustic noise, time series, autoregression, average variable, phase space.

### Постановка проблеми

Современные электромеханические промышленные комплексы, как правило, состоят из большого числа взаимодействующих элементов. Относительные перемещения этих элементов порождают вибрации, которые могут критически сказаться на работе прецизионных мехатронных систем. Это может привести к предельным режимам работы оборудования, а в ряде случаев и выходу его из строя.

Эффективным средством предупреждения аварий, выявления критических режимов работы, диагностики неисправностей оборудования электромеханических систем (ЭМС) являются методы функциональной диагностики [1]. В последнее время особый интерес проявляется к созданию методов и способов диагностирования технического состояния электромеханических систем, основанных на изучении в них колебательных (вибрационных) и акустических процессов.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Шумы аппаратов и машин также характеризуют как общие свойства систем, так и свойства их частей. Опыт применения акустических методов показывает, что в состоянии нормального функционирования энергия шума в основном концентрируется в области низких частот, а энергия, соответствующая дефектам, располагается на более высоких частотах. Это обстоятельство используют для своевременного обнаружения зарождающихся нарушений. Недостаток большинства акустических методов - необходимость иметь в памяти системы контроля набор реализаций сигналов или статистические характеристики сигналов всех состояний функционирования [1].

Сущность проблемы функциональной диагностики состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки параметров технических состояний электромеханических узлов, без их разборки по характеристикам вибрационных процессов, сопровождающих их функционирование. Современная вычислительная техника позволяет усовершенствовать технологию проверки параметров ЭМС за счет автоматизации процессов измерения и использования программных средств диагностики. Измерение и анализ сигналов в системах виброакустической диагностики электромеханических систем чаще всего производятся с помощью приборов, приспособленных для работы в промышленных условиях. В то же время эти операции могут выполняться и с помощью компьютера, на входе которого устанавливаются устройства, питающие измерительные преобразователи, усиливающие электрические сигналы и преобразующие сигналы в цифровую форму.

В настоящее время основными методами обработки результатов измерений являются преобразование Фурье и Лапласа, классические методы анализа временных рядов, кратномасштабного, вейвлет-анализа и т.д. [2] – [5]. Недостатком применяемых подходов является вычислительная сложность при осуществлении дискретных преобразований и необходимость наличия значительных объемов памяти для хранения эталонных значений.

Методы функциональной диагностики в режиме реального времени, требуют выполнения большого количества расчетов, математического моделирования объекта, обработки большого объема информации, что обуславливает обязательное применение вычислительной техники.

Разные методы обработки акустических сигналов позволяют выделить широкий спектр характеристик как статических, так и динамических.

Для цифровой обработки акустических сигналов от ЭМС используют ряд методов [6]:

- методы линейной фильтрации, которые позволяют проводить селекцию сигналов в необходимой частотной области;
- спектральный анализ, при помощи которого обрабатывают различные виды сигналов;
- частотно-временной анализ, который используют для нахождения отклонений в чувствительных приемниках сигналов;
- адаптивная фильтрация, позволяющая проводить распознавание звуковых образов на основе ранее выявленных закономерностей, а также приглушать шумы;
- нелинейная обработка для расчета корреляций;
- высокоскоростная обработка – интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации.

Цель диагностики заключается в выявлении развития отказа ранее области наиболее интенсивного износа или разрушения. Поэтому необходимо иметь временную зависимость работы дефектных и бездефектных объектов контроля, а для обеспечения достоверных результатов применять статистические методы моделирования. В соответствии с вероятностным подходом все отклонения от нормы рассматриваются как случайные величины, а основным требованием является минимально допустимая вероятность отказа.

Ряд задач диагностики электромеханических комплексов в настоящее время можно реализовать акустическими методами, путем анализа сигналов, полученных с работающих узлов в режиме реального времени.

Актуальной научной задачей является разработка эффективных алгоритмов функционального диагностирования реализуемых на ЭВМ, которые в полной мере учитывают технические и экономические требования, ограничения при оптимизации, стохастический характер внешних воздействий и т.п. При построении алгоритмов функциональной диагностики надо учитывать специфику решаемой задачи, использовать современные приемы и методы оптимизации, применять накопленный опыт в смежных областях.

### Цель исследования

Целью исследований является формирование процедуры анализа акустических сигналов, порождаемых работающим оборудованием электромеханических комплексов, на основе использования современных методов цифровой обработки временных рядов в реальном времени.

### Изложение основного материала исследования

Характерные шумовые сигналы электромеханического оборудования имеют периодические и непериодические составляющие. Параметры шумовых сигналов изменяются со временем – у бездефектных устройств медленно, а в оборудовании, что приближается к состоянию разрушения, очень быстро. Принято, что в пределах всего срока службы устройств его характерный шумовой сигнал является интервально-стационарным процессом при условии, что интервалы наблюдений выбираются для каждого типа устройств, а сигналы рассматриваются как реализации случайного процесса с нормальным распределением.

Нормальному состоянию или режиму функционирования контролируемых объектов соответствуют, как правило, стационарные случайные процессы и, следовательно, стационарные изменения параметров временных рядов. Объекты, информативные параметры которых зависят от условий их эксплуатации, нестационарны по своей природе и описываются функцией нестационарности.

В случае нарушения режимов работы контролируемого оборудования вид функции нестационарности изменяется. Для анализа нестационарных дискретных сигналов в качестве модели в пределах подвижного окна часто выбирают авторегрессионную модель скользящего среднего вида [2],[3]

$$y[k] = A_0 y[k-1] + A_1 y[k-2] + A_2 y[k-3] + A_3 y[k-4], \quad (1)$$

коэффициенты которой определяются по измерениям методом наименьших квадратов.

Построение моделей вида (1) для акустических сигналов, записанных при работе электромеханического оборудования с различными частотами вращения и степени нагружения, показало наличие существенной зависимости коэффициентов модели от изменения условий функционирования [4]. Однако, значения среднеквадратического отклонения модели оказались в диапазоне от 3.2% до 25.2%, что свидетельствует о низком качестве ряда моделей.

Основная энергия акустического сигнала, регистрируемого при работе электромеханического оборудования, сосредоточена в области средних частот 200–7000 Гц. Для анализа сигнала в инженерной практике используется два канала: первый канал с частотным диапазоном 200–500 Гц, второй – 1000–2500 Гц. Для первого канала характерно отсутствие фиктивных высокоэнергетических составляющих. Во втором диапазоне энергия полезных сигналов значительно (приблизительно в 2 раза) превышает энергию шумовых составляющих компонент сигнала. По сути, диапазоны частот каналов выбирались так, чтобы “шумовых” составляющих (сигналов, не несущих полезную информацию) было по возможности меньше.

Для выделения диапазона частот традиционно используют процедуры фильтрации. Наилучшими характеристиками среди фильтров низких частот (ФНЧ) обладают фильтры Баттерворта [4] с передаточной функцией вида:

$$H_B(p) = \frac{1}{B_n(p)}, \quad (2)$$

где  $B_n(p)$  - полином Баттерворта  $n$ -го порядка. Полиномы Баттерворта младших порядков имеют вид:

$$B_1(p) = p + 1, \quad (3)$$

$$B_2(p) = p^2 + 1.414136p + 1, \quad (4)$$

$$B_3(p) = p^3 + 2p^2 + 2p + 1, \quad (5)$$

$$B_4(p) = p^4 + 2.6131259p^3 + 3.41421362p^2 + 2.6131259p + 1, \quad (6)$$

$$B_5(p) = p^5 + 3.236068p^4 + 5.236068p^3 + 5.236068p^2 + 3.236068p + 1. \quad (7)$$

Увеличение диапазона фильтрации  $\omega_c$  нормированного фильтра низких частот достигается подстановкой в  $H(p)$

$$p \rightarrow \frac{p}{\omega_c}. \quad (8)$$

Полосовой фильтр (ПФ) можно получить на основе фильтра низкой частоты, используя стандартные преобразования [7]. Для преобразования нормированного ФНЧ в полосовой со средней частотой  $\omega_0$  рад/сек и полосой пропускания  $\Delta\omega$  рад/сек необходимо в передаточной функции  $H(p)$  нормированного фильтра сделать замену:

$$p \rightarrow \frac{p^2 + \omega_0^2}{p\Delta\omega}. \quad (9)$$

Средняя частота полосы пропускания задается как среднее геометрическое частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (нижней и верхних границ пропускания полосового фильтра), то есть:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2}. \quad (10)$$

Ширина полосы пропускания определяется как:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1. \quad (11)$$

На рис.1 приведен акустический сигнал, полученный в результате эксперимента при работе электромеханического оборудования. На записанном сигнале можно выделить ряд характерных зон: 1 – начальный участок, соответствующий разгону двигателя до номинальной скорости; 2 – участок, соответствующий нормальному режиму работы двигателя; 3 – участок с дополнительными возмущениями, характеризующими наличие нарушений в работе двигателя.

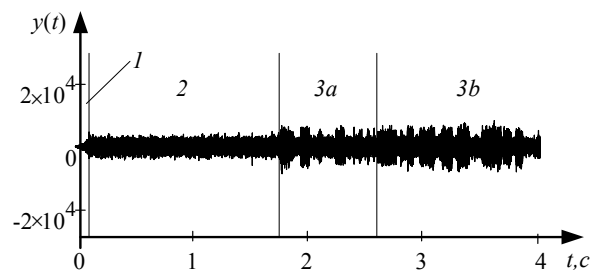


Рис.1. Акустический сигнал, полученный в результате эксперимента

Результаты опытов сохранены с помощью звукозаписывающей аппаратуры в формате \*.wav, с частотой дискретизации 44 кГц и 16-битной глубиной.

Для последующей обработки полученного временного сигнала с целью анализа влияния изменения нагрузки на характеристики акустического сигнала вырезается фрагмент из зоны 2. Если необходимо идентифицировать режимы сбойной работы и диагностировать причину аварийного состояния, то для обработки надо выбирать фрагмент из 3 зоны (фрагменты 3а или 3б). На рис.2 приведены фрагменты сигнала, выбранные из зоны 2 (см рис.2,а) и зоны 3 (см. рис.2,б).



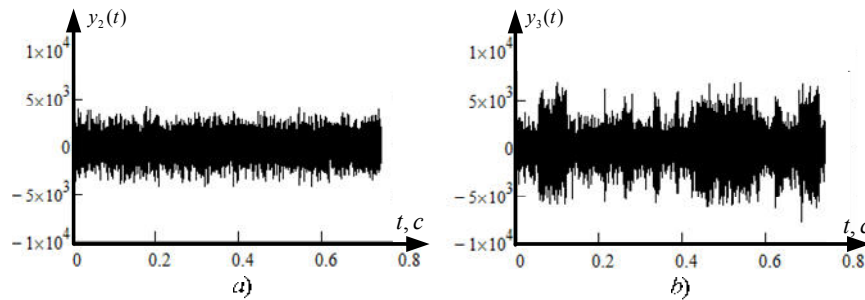


Рис.2. Фрагменты акустического сигнала: а) сигнал, выбранный из зоны 2, б) сигнал, выбранный из зоны 3.

На первом этапе обработки сигналы были пропущены через фильтр низких частот с частотой среза 100Гц и полосовой фильтр с диапазоном частот 1500-2500Гц. Передаточные функции фильтров 5-го порядка

- низких частот

$$H_1(p) = \frac{1}{p^5 + 3.236068p^4 + 5.236068p^3 + 5.236068p^2 + 3.236068p + 1}. \quad (12)$$

- полосовой

$$H_2(p) = 1.52 \cdot 10^{13} p^5 / (0.002p^{10} + 9.71p^9 + 4.86 \cdot 10^4 p^8 + 1.32 \cdot 10^8 p^7 + 3.3 \cdot 10^{11} p^6 + 5.6 \cdot 10^{14} p^5 + 8.4 \cdot 10^{17} p^4 + 8.3 \cdot 10^{20} p^3 + 7.6 \cdot 10^{23} p^2 + 3.8 \cdot 10^{26} p + 1.9 \cdot 10^{29}). \quad (13)$$

Фрагменты исходных сигналов и сигналов, полученных в результате фильтрации ФНЧ и ПФ для участков зафиксированных сигналов из зоны 2 и зоны 3 (на рис. 2), показаны в таблице 1. Спектры амплитуд сигналов до и после обработки с помощью цифровых фильтров приведены в таблице 2. В таблице 3 показана динамика сигналов в фазовом пространстве.

Таблица 1 – Результаты фильтрации акустического сигнала

|        | ФНЧ | ПФ |
|--------|-----|----|
| Зона 2 |     |    |
| Зона 3 |     |    |

На графиках, приведенных в таблице 1, исходный сигнал обозначен цифрой 1, а сигнал, полученный в результате фильтрации, – цифрой 2.

Для сигналов до и после обработки были рассчитаны авторегрессионные модели скользящего среднего, которые имеют вид

$$y_2[k] = 2.04y[k-1] - 2.05y[k-2] + 1.66y[k-3] - 1.09y[k-4] + 0.36y[k-5],$$

$$y_{2l}[k] = 4.85y[k-1] - 9.49y[k-2] + 9.39y[k-3] - 4.69y[k-4] + 0.95y[k-5],$$

$$y_{2b}[k] = 4.61y[k-1] - 8.78y[k-2] + 8.63y[k-3] - 4.38y[k-4] + 0.92y[k-5],$$

$$y_3[k] = 1.42y[k-1] - 1.61y[k-2] + 1.49y[k-3] - 0.71y[k-4] + 0.22y[k-5],$$

$$y_{3l}[k] = 4.74y[k-1] - 9.07y[k-2] + 8.77y[k-3] - 4.28y[k-4] + 0.84y[k-5],$$

$$y_{3b}[k] = 4.6y[k-1] - 8.74y[k-2] + 8.57y[k-3] - 4.33y[k-4] + 0.9y[k-5].$$

Таблица 2 – Спектры амплитуд сигналов до и после обработки

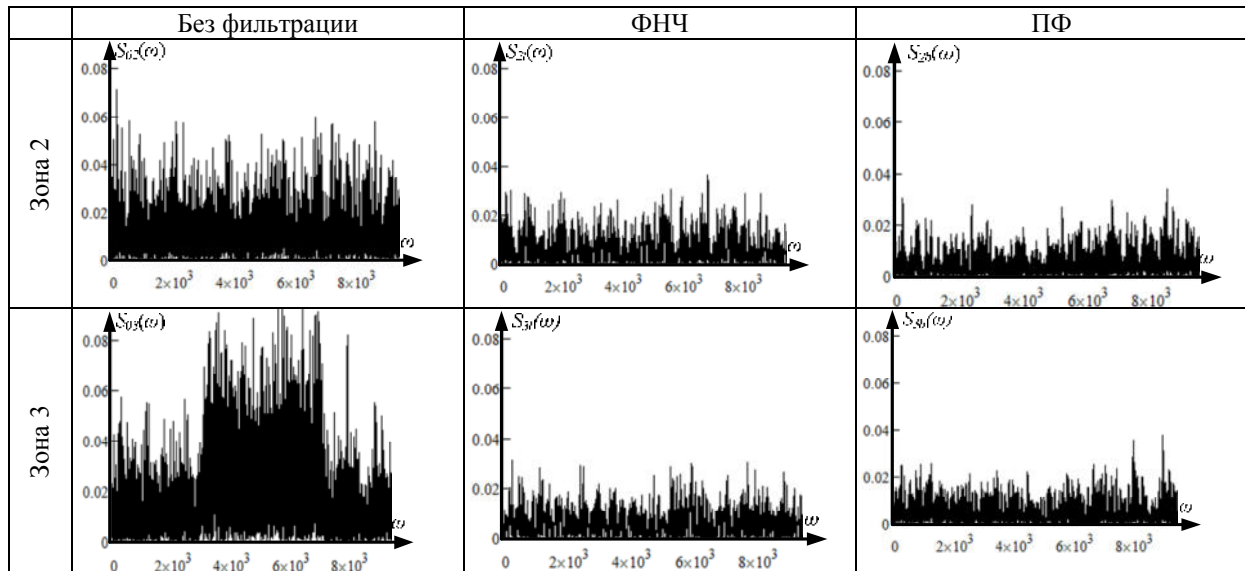
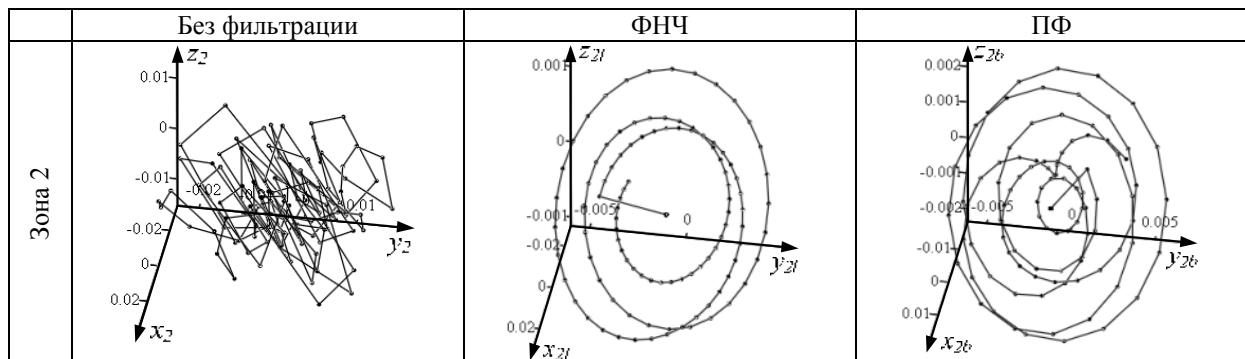
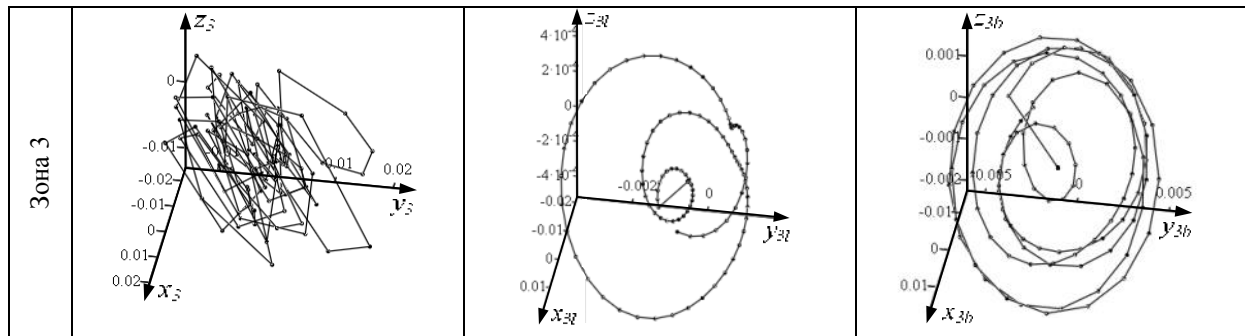


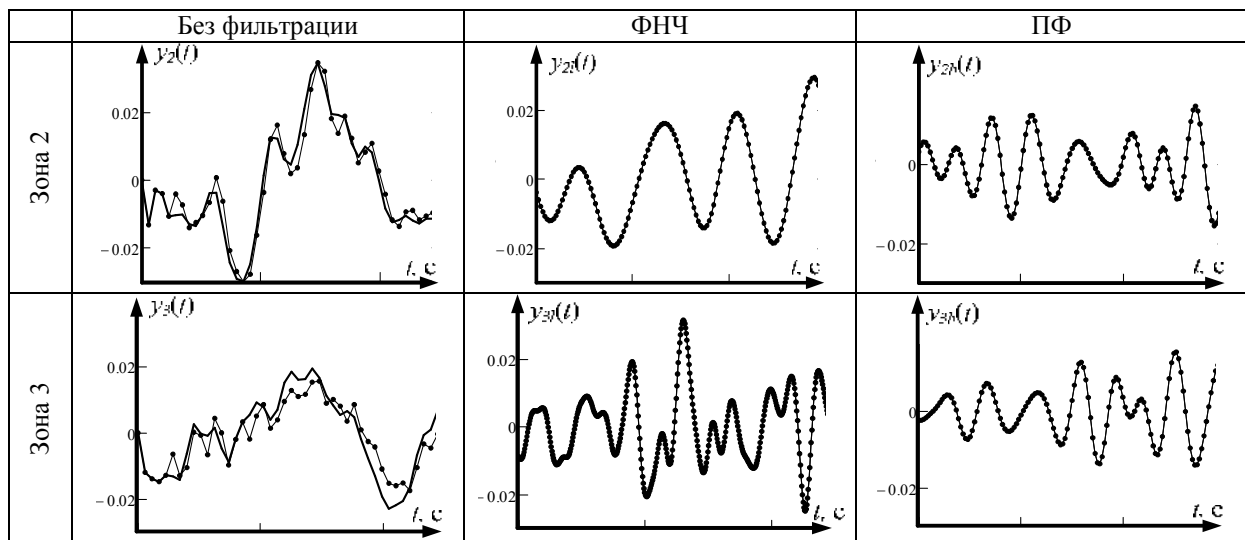
Таблица 3 – Динамика сигналов в фазовом пространстве





На графиках в таблице 4 показаны фрагменты акустического сигнала из зоны 2 и зоны 3 (выделены сплошной линией), и их модели (выделены точками).

Таблица 4 – Фрагменты акустических сигналов из зоны 2 и зоны 3, и их модели



Даже визуально наблюдается устранение хаотичности в поведении сигнала в результате его разделения по частотным диапазонам, что способствует упрощению анализа и приводит к построению более адекватных моделей.

### Выводы

Методы цифровой обработки акустических сигналов электромеханических систем являются перспективным способом диагностики. После формирования двух каналов из исходного сигнала, в которых сосредоточена вся полезная информация, можно для выделения информационных признаков использовать стандартные методы цифровой обработки сигналов. Это позволит реализовать системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим определением (постановкой диагноза в темпе измерения диагностических сигналов) неисправностей узлов машинного оборудования, степени их опасности и формированием перечня компенсирующих мероприятий.

### Список использованной литературы

1. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. Москва: Наука, 1984. 120 с.
2. Малайчук В.П., Мозговой А.В. Математическая дефектоскопия. Днепропетровск: Системные технологии, 2005. 180 с.
3. Kondratieva I.U., Rudakova N.V., Polyvoda O.V. Using acoustic methods for monitoring the operating modes of the electric drive in mobile objects. 2018 IEEE 5th International Conference, Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). Kyiv, 2018. pp. 218-221.
4. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2005. 496 с.
5. Малайчук В.П., Петренко О.М., Рожковский В.Ф. Обработка измерений и сигналов нерулевого контроля. Днепропетровск: РВВ ДНУ, 2010. 140 с.
6. Михалев А.И., Винокурова Е.А., Сотник С.Л. Компьютерные методы интеллектуальной обработки данных. Днепропетровск: Системные технологии, 2014. 209 с.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2002. 606 с.

**References**

1. Balitskiy F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Homyakov E.I. Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayuschihsya defektov. Moskva: Nauka, 1984. 120 s.
2. Malaychuk V.P., Mozgovoy A.V. Matematicheskaya defektoskopiya. Dnepropetrovsk: Sistemnyie tehnologii, 2005. 180 s.
3. Kondratieva I.U., Rudakova H.V., Polyvoda O.V. Using acoustic methods for monitoring the operating modes of the electric drive in mobile objects. 2018 IEEE 5th International Conference, Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). Kyiv, 2018. pp. 218-221.
4. Voloshchiuk Yu.I. Syhnaly ta protsesy u radiotekhnitsi. Kharkiv: TOV «Kompaniia SMIT», 2005. 496 s.
5. Malaichuk V.P., Petrenko O.M., Rozhkovskiy V.F. Obrobka vymiriuvan i syhnaliv neruinivnoho kontroliu. Dnipropetrovsk: RVV DNU, 2010. 140 s.
6. Mihalev A.I., Vinokurova E.A., Sotnik S.L. Kompyuternye metodyi intellektualnoy obrabotki dannyih. Dnepropetrovsk: Sistemnyie tehnologii, 2014. 209 s.
7. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov. SPb: Piter, 2002. 606 s.

УДК 515.2:528.71

О. В. РЕУТА, Х. ХАБРАМАН, А. О. ЯКУНІН  
Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара**ПОБУДОВА СКЛАДЕНИХ ВОКСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ОПЕРАЦІЙ НАД НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ**

Запропоновано підхід до побудови складених воксельних моделей просторових об'єктів на основі їх інтерпретації як нечітких множин. Інтерпретація базується на аналогії між функцією належності нечіткої множини і оптичною щільністю вокселя і дозволяє залучити апарат теорії нечітких множин, зокрема, такі операції над ними, як об'єднання, перетин, віднімання, для побудови складених воксельних моделей з елементарних. Також наводиться процедура побудови складеної воксельної моделі з урахуванням прозорості вокселів. Виконана візуалізація результатуючих моделей з напівпрозорими і класичними вокселями засобами пакету Blender. Розроблене відповідне програмне забезпечення.

Ключові слова: форма просторового об'єкту, воксельна модель, оптична щільність, напівпрозорий воксел, функція належності, нечітка множина, об'єднання, перетин, різниця, візуалізація, Blender

А. В. РЕУТА, Х. ХАБРАМАН, А. А. ЯКУНИН  
Днепровский национальный университет им. Олеся Гончара**ПОСТРОЕНИЕ СОСТАВНЫХ ВОКСЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПЕРАЦИЙ НАД НЕЧЕТКИМИ МНОЖЕСТВАМИ**

Предложен подход к построению составных воксельных моделей пространственных объектов на основе их интерпретации как нечетких множеств. Интерпретация базируется на аналогии между функцией принадлежности нечеткого множества и оптической плотностью вокселя и позволяет привлечь аппарат теории нечетких множеств, в частности, такие операции над ними, как объединение, пересечение, вычитание, для построения составных воксельных моделей из элементарных. Также приводится процедура построения составных воксельных модели с учетом прозрачности вокселей. Выполнена визуализация результирующих моделей с полупрозрачными и классическими вокселями средствами пакета Blender. Разработано соответствующее программное обеспечение.

Ключевые слова: форма пространственного объекта, воксельная модель, оптическая плотность, полупрозрачный воксел, функция принадлежности, нечеткое множество, объединение, пересечение, разность, визуализация, Blender

O. V. REUTA, H. HABRUMMAN, A. O. YAKUNIN  
Dnipro National University of Oles Honchar**BUILDING OF COMPOSITE VOXEL MODELS OF 3D OBJECTS  
USING FUZZY SET OPERATIONS**

The work is devoted to the problems of interactive data representation and analysis and relates to the field of scientific visualization, in particular, volume rendering and visualization.

Modern information systems, whose functions include generation and analysis of visual images of 3D objects, require simple models, which could be processed and manipulated using simple arithmetic operations in real time. One of the most popular model is a voxel model, which is simple, regular and provides sufficient accuracy of presentation. It is known and used for a long time and has lots of applications. The problem is that the basic operations implemented for voxel models are mostly limited by synthesis based on an existing data array and visualization.

The paper proposes an approach to constructing complex voxel models of 3D objects using a composition of elementary ones, based on their interpretation as fuzzy sets, which enables the involvement of appropriate operations such as union, intersection and subtraction well defined in the fuzzy set theory.

It is supposed that a 3D object is described by its indicator function. A voxel models of such an object's is a set of voxels. The interpretation of this model as a fuzzy set is possible on the basis of the fact that a normalized optical density of a material of the voxel determines its belonging the model, just as a membership function determines the belonging of an element to a fuzzy set.

A value of the optical density of the voxel for an object defined by its indicator function could be calculated using an approach based on a set of test points where this value is considered as a relation of number of test points that belong to object's shape to number of all points filling voxel's volume.



*Just as for fuzzy sets, for voxel object models, subtraction, union, intersection and symmetric difference are defined and a corresponding procedure is described.*

*A software, that implements the considered procedure for generation of models, is developed and uploaded to the public repository. It allows to store composite voxel models in formats suitable for visualization in Blender — free and open source 3D creation suite. In the future, it is planned to improve a presentation format of voxel models with classical and semi-transparent voxels.*

*Keywords: 3D object shape, voxel model, optical density, semi-transparent voxel, membership function, fuzzy set, union, intersection, subtraction, visualization, Blender*

### Постановка проблеми

Сучасні інформаційні системи, в функції яких входить формування і аналіз візуальних образів просторових об'єктів (системи комп'ютерної графіки і комп'ютерного бачення, системи створення доповненої реальності, дослідження астрономічних даних, медичної діагностики, штучного інтелекту тощо) вимагають простих моделей, маніпуляція якими здійснювалася б із застосуванням простих арифметичних операцій в реальному часі. Одними з найбільш поширених, завдяки своїй простоті і достатній точності подання просторових об'єктів, є воксельні моделі. Однак, основні операції, які реалізовані для таких моделей, є лише формування з існуючого масиву даних і візуалізація [1 – 4].

В даній роботі пропонується підхід до побудови комплексних воксельних моделей просторових об'єктів шляхом композиції, на основі їх інтерпретації як нечітких множин, що дає можливість залучення відповідних операцій об'єднання, перетину і віднімання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження воксельних моделей останнім часом ведеться здебільшого спрямовано в напрямку отримання якісної візуалізації форм просторових об'єктів. Застосування нечіткої логіки в операціях маніпуляції ними або їх аналізу значно обмежені. Так, відомі дослідження, пов'язані з моделювання активності людей, що рухаються, на основі відео-потоків, що фіксує їх рухи [2]. В медичній діагностиці воксельні моделі ракових пухлин, отриманих протонно-емісійними сканерами, деталізуються з урахуванням нечіткого характеру їх контуру [3]. Однак повною мірою апарат нечіткої логіки для аналізу і синтезу воксельних моделей не застосовується.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо просторовий об'єкт  $\Omega$  поданий індикаторною функцією  $\Phi(x, y, z)$ , яка приймає значення 1 у точках простору, що належать об'єкту, і 0 в інших. Покажемо, що дискретне подання такого об'єкту у вигляді воксельної моделі може бути описане у термінах теорії нечітких множин, що дасть можливість застосувати операції над нечіткими множинами для маніпуляції такими моделями.

Згідно класичного визначення нечіткої множини [4], якщо  $X$  є простором точок (об'єктів)  $x$ , тобто  $X = \{x\}$ , то нечітка множина  $A$  в  $X$  ( $A \subseteq X$ ) визначається характеристичною функцією належності  $\mu_A(x)$ , яка встановлює для кожної точки  $x$  з  $X$  дійсне число з діапазону  $[0, 1]$ . Значення  $\mu_A(x)$  представляє «ступінь членства»  $x$  в  $A$ . Таким чином, чим ближче значення  $\mu_A(x)$  до одиниці, чим вище ступінь належності  $x$  до  $A$ . Коли  $A$  є множиною в звичайному розумінні терміну, його функція належності може приймати тільки два значення 0 і 1, причому  $\mu_A(x) = 1$  або 0 відповідно до того, належить  $x$  до  $A$ , чи ні, і у цьому випадку зводиться до звичної характеристичної функції множини  $A$ .

Встановимо зв'язок між нечіткою множиною і воксельною моделлю просторового об'єкту. Дискретний простір  $V$  воксельної моделі є простором вокселів  $v$ ,  $V = \{v\}$ . Приймемо наступні припущення. Вважатимемо, що воксел  $v$  є прямокутним паралелепіпедом із центром у точці  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  і довжинами сторін  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  та  $\Delta_z$  вздовж відповідних координатних осей. Матеріал воксела однорідний з оптичною щільністю  $\rho(v)$ , значення якої нормовано таким чином, що воксел із матеріалу з оптичною щільністю 0 є абсолютно прозорим і тому невидимим, а зі щільністю 1 — непрозорим. Випадок  $\rho(v) = 1$  описує класичний воксел, який традиційно використовується в комп'ютерній графіці. Якщо значення оптичної щільності воксела лежить в інтервалі  $(0, 1)$ , то такий воксел є напівпрозорим [1]. Тоді воксельна модель  $V_\Omega$  об'єкту  $\Omega$  складається з вокселів, для яких  $\rho(v) > 0$ . З урахуванням умови нормування, оптичну щільність можна вважати функцією належності воксела до воксельної моделі, що подає просторовий об'єкт  $\Omega$ . Позначимо її як  $\rho_\Omega(v)$ . Дійсно, згідно

наведеного вище визначення,  $\rho_{\Omega}(v)$  встановлює для кожного вокселя  $v$  дискретного простору  $V$  дійсне число з діапазону  $[0,1]$ , що показує «ступінь належності» вокселя  $v$  до моделі  $V_{\Omega}$  об'єкту  $\Omega$ . Воксели, що не належать моделі мають  $\rho_{\Omega}(v)=0$ , тобто є прозорими, невидимими, ті ж, що включаються в неї  $v \in V_{\Omega}$ , мають ненульову прозорість  $\rho_{\Omega}(v)>0$  і тому видимі.

Залежність оптичної щільності вокселя  $\rho_{\Omega}(v)$  від індикаторної функції  $\Phi(x,y,z)$  об'єкту  $\Omega$  описана в [1], а її конкретне значення може бути обчислене на основі використання тестових точок [5].

Заповнивши об'єм вокселя  $v_i$  множиною тестових точок  $V_i$ , отримаємо підмножину  $\Phi_i \subseteq V_i$  точок, які належать об'єкту  $\Omega$ , тобто точок, для яких  $\Phi(x,y,z)=1$ . Тоді оптичну щільність вокселя можна визначити як

$$\rho_{\Omega}(v_i) = \|\Phi_i \cap V_i\| / \|V_i\|. \quad (1)$$

Відносна похибка  $\delta$  визначення  $\rho_{\Omega}(v_i)$ :

$$\delta = \left( 2^3 \sqrt{\|V_i\|} \right)^{-1}. \quad (2)$$

На рис. 1 показана воксельна модель сфери, візуалізація якої виконана в середовищі пакету Blender [6] шляхом безпосередньої побудови вокселів як примітивних кубів з відповідними текстурами (рис. 1, а та б), так і застосовуючи техніку «куба даних» для візуалізації воксельних даних у форматі Blender Voxel Data (рис. 1, в) [7]. Всі моделі на рис. 1 мають параметри  $N_x = N_y = N_z = 11$ ,  $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = \Delta$ , радіус сфери  $R = 5\Delta$ . Модель на рис. 1, а побудована з класичних вокселів, а на рис. 1, б та в — з напівпрозорих, оптична щільність яких розраховувалась за описаною вище схемою (1) для  $\|V_i\| = 5^3 = 125$  і  $\delta = 0,1$ .

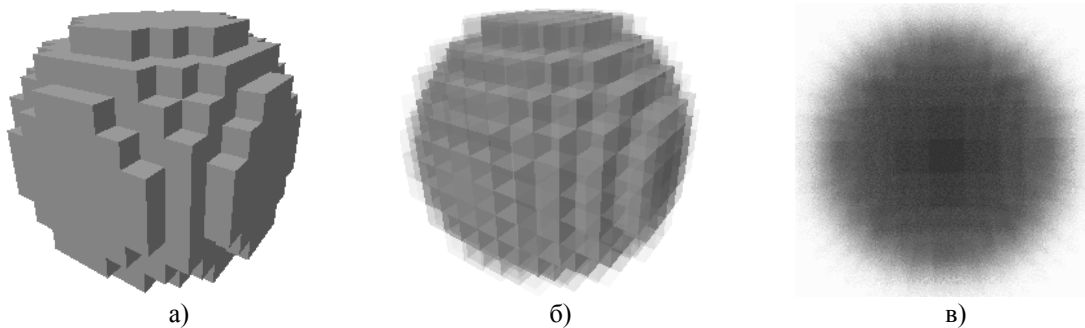


Рис. 1. Приклад візуалізації воксельної моделі просторового об'єкту засобами пакету Blender

Розглянемо можливості, які надає запропонована інтерпретація воксельних моделей як нечітких множин, серед яких, перш за все, слід виділити операції над нечіткими множинами, які можуть бути застосовані до воксельних моделей.

В теорії нечітких множин основні операції над множинами  $A$  і  $B$ , що утворюють триплет Де Моргана, є доповнення  $\overline{A}$ , об'єднання  $A \cup B$  і перетин  $A \cap B$ , які визначаються через операції над їх функціями належності наступним чином [5]:

$$\begin{aligned} \mu_{\overline{A}}(x) &= 1 - \mu_A(x), \\ \mu_{A \cup B}(x) &= \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Як було показано, для воксельних моделей аналогом функцій належності є оптичні щільності, що дає можливість використати вирази (3) для визначення відповідних операцій над воксельними моделями просторових об'єктів. При цьому слід зауважити, що при маніпуляції воксельними моделями,

операція доповнення не має практичного значення, і тому доцільно замінити їх операцією визначення різниці двох моделей.

В результаті для воксельних моделей  $V_A$  і  $V_B$  об'єктів  $A$  і  $B$  маємо визначення операцій віднімання  $A/B$ , об'єднання  $A \cup B$ , перетину  $A \cap B$  і симетричної різниці множин  $A \oplus B$ :

$$\begin{aligned}\rho_{A/B}(v) &= \max\{\rho_A(v) - \rho_B(v), 0\}, \\ \rho_{A \cup B}(v) &= \max\{\rho_A(v), \rho_B(v)\}, \quad \rho_{A \cap B}(v) = \min\{\rho_A(v), \rho_B(v)\}, \\ \rho_{A \oplus B}(v) &= \max\{\max\{\rho_A(v) - \rho_B(v), 0\}, \max\{\rho_B(v) - \rho_A(v), 0\}\}.\end{aligned}\quad (4)$$

Аналогічно можна отримати умову того, що один об'єкт (модель) включається в іншу —  $A \subseteq B$  або  $A \subset B$ , відповідно

$$\rho_A(v) \leq \rho_B(v) \text{ та } \rho_A(v) < \rho_B(v). \quad (5)$$

Стосовно виразів (4), (5) слід зробити важливе зауваження. Для виконання операцій (4) і перевірки умов (5) воксельні моделі обох об'єктів  $A$  і  $B$  повинні мати воксели однакового розміру і форми, а центри всіх вокселів мають співпадати з вузлами однієї загальної просторової решітки. Якщо ці умови не виконуються, моделі об'єктів мають бути редискредитовані відповідним чином [8], а також, за потреби, здійснена трансляція однієї моделі відносно іншої.

Наведемо кроки загальної процедури побудови воксельної моделі просторового об'єкту шляхом об'єднання існуючих моделей за допомогою операцій (4).

Першим кроком будь-якої операції над моделями має бути побудова габаритного контейнера результуючої моделі [1, 5, 8]. Вважатимемо, що габаритний контейнер просторового об'єкту  $\Omega$  є прямокутний паралелепіпед з лінійними розмірами  $L_x^\Omega$ ,  $L_y^\Omega$ ,  $L_z^\Omega$  і кількістю вокселів вздовж кожної з осей  $N_x^\Omega$ ,  $N_y^\Omega$ ,  $N_z^\Omega$ . Відповідно лінійні розміри воксела  $\Delta_\xi^\Omega = L_\xi^\Omega / N_\xi^\Omega$ , де  $\xi = \{x, y, z\}$  тут і надалі позначає одну з декартових координат. Тоді для двох просторових об'єктів  $A$  і  $B$ , незалежно від операції (4) але вважаючи, що  $\Delta_\xi^A = \Delta_\xi^B = \Delta_\xi^\Gamma = \Delta_\xi$ , як зазначено в зауваженні до виразів (4) і (5), параметри габаритного контейнеру результуючого об'єкту  $\Gamma$  визначатимуться наступним чином:

$$L_\xi^\Gamma = L_\xi^A + L_\xi^B - d_\xi \quad \text{і} \quad N_\xi^\Gamma = N_\xi^A + N_\xi^B - d_\xi / \Delta_\xi, \quad (6)$$

де  $d_\xi$  — відповідна компонента вектору  $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$ , що є вектором перенесення центру габаритного контейнеру об'єкту  $B$  відносно контейнера об'єкту  $A$ . При цьому має виконуватись умова:

$$d_\xi = \left\{ n + \left( \left| N_\xi^A - N_\xi^B \right| \bmod 2 \right) / 2 \right\} \Delta_\xi, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

Другим кроком є визначення множини вокселів, що заповнює простір габаритного контейнера результуючої моделі  $V_\Gamma$ . Це виконується з урахуванням того факту, що розміри вокселів фіксовані, а лінійні розміри габаритного контейнера встановлені.

Для зручності координати воксела можуть бути замінені його індексом  $i$  або трійкою індексів  $(i, j, k)$  в залежності від того, який спосіб подання множини вокселів застосовується.

Як приклад, можна скористатися наступним співвідношенням:

$$\xi = \xi_c + \left[ q - (N_\xi - 1) / 2 \right] L_\xi / N_\xi, \quad (8)$$

де  $q \in \{i, j, k\}$  позначає один з індексів вокселя відповідно декартовим координатам  $\xi = \{x, y, z\}$ .

Також встановлюється нова система координат із початком в центрі габаритного контейнера результуючої моделі. Надалі координати вокселів всіх трьох моделей визначаються відносно цієї системи.

Наступним кроком є формування результуючої моделі на основі обраної операції об'єднання моделей. Загальна схема цього процесу наступна.

Для кожного вокселя результуючої моделі за обраною операцією (4) виконується обчислення його оптичної щільності (1), яка зумовлює його видимість. Аргументи операції визначаються на основі положення вокселя. При цьому можливі наступні варіанти:  $\rho_A(v)$  і 0 (варіант I), 0 і  $\rho_B(v)$  (варіант II),  $\rho_A(v)$  і  $\rho_B(v)$  (варіант III) та 0 і 0 (варіант IV). Останній випадок не вимагає обчислень оскільки за будь-якої операції (4) її результат буде 0. Положення вокселя в межах габаритного контейнеру  $V_\Gamma$  задається індексами  $q \in \{i, j, k\}$ , значення яких змінюються в межах  $0 \leq q < N_\xi + d_\xi / \Delta_\xi$  і для яких може виконуватись одна з умов:

$$0 \leq q < d_\xi / \Delta_\xi \text{ (умова А), } d_\xi / \Delta_\xi \leq q < N_\xi \text{ (умова Б), } N_\xi \leq q < N_\xi + d_\xi / \Delta_\xi \text{ (умова В).} \quad (9)$$

Три умови (9) для кожного з трьох індексів  $q$  дають  $3^3=27$  комбінацій вибору аргументів для обраної операції об'єднання воксельних моделей (табл. 1).

Таблиця 1. Варіанти комбінацій аргументів в операціях (4) в залежності від умови (9) для координат центру вокселя

| № | Умова    |          |          | Вари-<br>ант | №  | Умова    |          |          | Вари-<br>ант | №  | Умова    |          |          | Вари-<br>ант | №  | Умова    |          |          | Вари-<br>ант |
|---|----------|----------|----------|--------------|----|----------|----------|----------|--------------|----|----------|----------|----------|--------------|----|----------|----------|----------|--------------|
|   | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |              |    | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |              |    | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |              |    | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> |              |
| 1 | A        | A        | A        | I            | 8  | A        | B        | Б        | IV           | 15 | Б        | Б        | В        | II           | 22 | В        | Б        | A        | IV           |
| 2 | A        | A        | Б        | I            | 9  | A        | В        | В        | IV           | 16 | Б        | В        | A        | IV           | 23 | В        | Б        | Б        | II           |
| 3 | A        | A        | В        | IV           | 10 | Б        | A        | A        | I            | 17 | Б        | В        | Б        | II           | 24 | В        | Б        | В        | II           |
| 4 | A        | Б        | A        | I            | 11 | Б        | A        | Б        | I            | 18 | Б        | В        | В        | II           | 25 | В        | В        | A        | IV           |
| 5 | A        | Б        | Б        | I            | 12 | Б        | A        | В        | IV           | 19 | В        | A        | A        | IV           | 26 | В        | В        | Б        | II           |
| 6 | A        | Б        | В        | IV           | 13 | Б        | Б        | A        | I            | 20 | В        | A        | Б        | IV           | 27 | В        | В        | В        | II           |
| 7 | A        | В        | A        | IV           | 14 | Б        | Б        | Б        | III          | 21 | В        | A        | В        | IV           |    |          |          |          |              |

На рис. 2 показані результати виконання об'єднання (рис. 2, а), перетину (рис. 2, б), віднімання другої моделі від першої (рис. 2, в) і першої від другої (рис. 2, г) для воксельних моделей з напівпрозорими вокселями. Просторовими об'єктами є сфери з параметрами, як і на рис. 1. Величина трансляції другої моделі відносно першої становить  $d_x / \Delta_x = d_y / \Delta_y = d_z / \Delta_z = 3$ . На рис. 3 ті самі результати показані для моделей з класичними непрозорими вокселями.

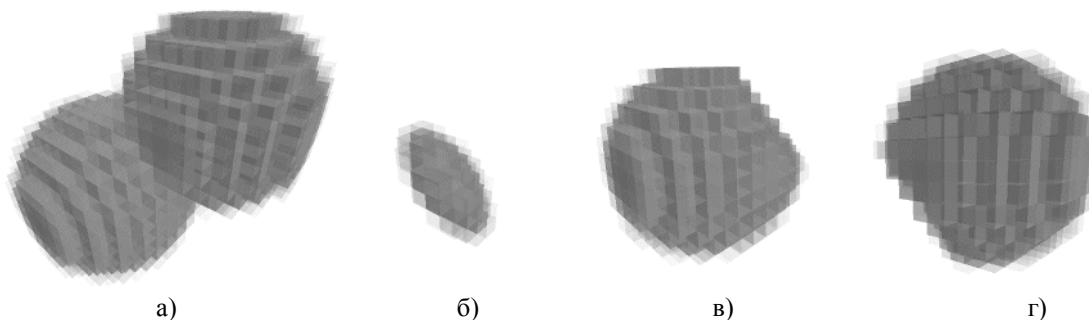


Рис. 2. Візуалізація результату об'єднання воксельних моделей сфер з напівпрозорими вокселями

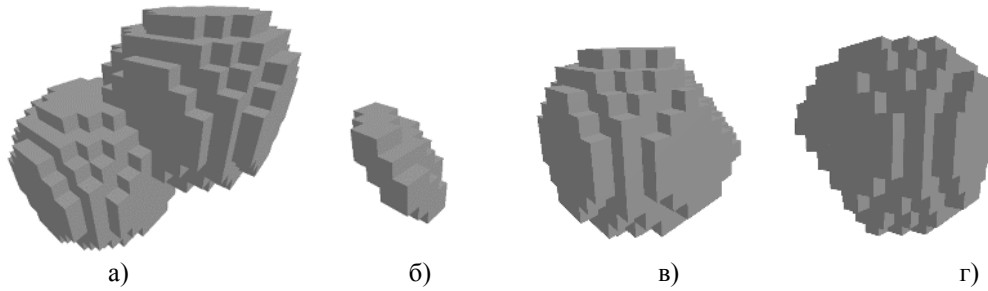


Рис. 3. Візуалізація результату об'єднання воксельних моделей сфер з непрозорими (класичними) вокселями

Програмне забезпечення, в якому реалізовані запропонований в роботі підхід побудови комплексних воксельних моделей з класичними і напівпрозорими вокселями, а також підготовка вихідних даних для їх візуалізації засобами пакету Blender, знаходиться у вільному доступі [9]. Воно включає програму побудови воксельних моделей і їх збереження в одному з двох форматів: як Python-скриптів для середовища Blender, або у вигляді бінарних файлів формату Blender Voxel Data.

### Висновки

Запропонована інтерпретація воксельних моделей з класичними і напівпрозорими вокселями як нечітких множин дозволяє залучити до процесу їх побудови операції над начіткими множинами, що дає можливість спростити процедуру отримання складених моделей. Розроблене програмне забезпечення, яке реалізує розглянуту процедуру генерації моделей і дає можливість зберігати їх у форматах, придатних для візуалізації в пакеті Blender. В подальшому планується вдосконалення формату подання воксельних моделей з класичними і напівпрозорими вокселями.

### Список використаної літератури

1. Реута О. В. Воксельна модель тривимірного об'єкту в задачах реконструкції його форми. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2008. Вип. 80. С. 500 – 504.
2. Linguistic Summarization of Video for Fall Detection Using Voxel Person and Fuzzy Logic / D. Anderson et al. *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. Vol. 113. P. 80 – 89.
3. A fuzzy locally adaptive Bayesian segmentation approach for volume determination in PET / Mathieu Hatt et al. *IEEE Trans Med Imaging*. 2009 Jun. 28 (6). P. 881 – 893.
4. Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. №8. P. 338 – 353.
5. Реута О. В. Використання напівпрозорих вокселів в дискретних моделях просторових об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2012. Вип. 4, т. 52. С. 107 – 111.
6. Blender 2.80 Reference Manual. URL: <https://docs.blender.org/manual/uk/dev/> (Last accessed 03.05.2019).
7. Matías Gárate. Voxel Datacubes for 3D Visualization in Blender. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017. Vol. 129. Num. 975. PP. 11. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/129/975/058010/pdf> (Last accessed 01.05.2019).
8. Реута О. В. Редискретизація моделі тривимірного тіла для задачі аналізу його тінеутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2010. Вип. 4, т. 41. С. 44 – 49.
9. Voxel models manipulation and visualization based on Fuzzy set operations (Golang, Python, Blender). URL: <http://github.com/oreuta/fuzzy-voxels> (Last accessed 03.05.2019).

### Список використаної літератури транслітерований

1. Reuta O. V. Vokselna model tryvymirnoho ob'ektu v zadachakh rekonstruktsii yoho formy. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. 2008. Vyp. 80. S. 500 – 504.
2. Linguistic Summarization of Video for Fall Detection Using Voxel Person and Fuzzy Logic / D. Anderson et al. *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. Vol. 113. P. 80 – 89.
3. A fuzzy locally adaptive Bayesian segmentation approach for volume determination in PET / Mathieu Hatt et al. *IEEE Trans Med Imaging*. 2009 Jun. 28 (6). P. 881 – 893.
4. Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. №8. P. 338 – 353.
5. Reuta O. V. Vykorystannia napivprozorykh vokseliv v dyskretnykh modeliakh prostorovykh ob'ektiv. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. 2012. Vyp. 4, t. 52. S. 107 – 111.
6. Blender 2.80 Reference Manual. URL: <https://docs.blender.org/manual/uk/dev/> (Last accessed 03.05.2019).
7. Matías Gárate. Voxel Datacubes for 3D Visualization in Blender. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017. Vol. 129. Num. 975. PP. 11. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/129/975/058010/pdf> (Last accessed 01.05.2019).
8. Reuta O. V. Redyskretyzatsiia modeli tryvymirnoho tila dlia zadachi analizu yoho tineutvorennia. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. 2010. Vyp. 4, t. 41. S. 44 – 49.
9. Voxel models manipulation and visualization based on Fuzzy set operations (Golang, Python, Blender). URL: <http://github.com/oreuta/fuzzy-voxels> (Last accessed 03.05.2019).



УДК 578.01+681.7.08+535.3+681.335.2

О.О. РОМАНОВ, О.В. ЦАРУК  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України  
О.О. БРОВAREЦЬ  
Київський кооперативний інститут бізнесу і права

## **НЕОБХІДНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ «ФЛОРАТЕСТ» ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ АГРОБІОЛОГІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР МЕТОДОМ ПРОВЕДЕННЯ ІНДУКЦІЇ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ НАТИВНОГО ХЛОРОФІЛУ**

*В умовах стрімкого росту населення нашої планети та виникнення продовольчих криз в окремих країнах, земля перетворюється на стратегічний ресурс, що забезпечує економічну безпеку й незалежність будь-якої держави. Саме для України, де земля є гарантом економічної стабільності та найбільшим національним багатством, раціональне її використання і збереження для майбутніх поколінь є одним із найбільших пріоритетних напрямків діяльності. Останніми роками відбувається інтеграція органічного, біологічного, біодинамічного, екстенсивного, інтенсивного та to-till землеробства з сучасними технологіями, зокрема із цифровими інформаційно-технічними системами локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь. Останній напрям є актуальним та перспективним для умов природно-кліматичних зон України.*

*Один із головних підходів при застосуванні цифрових технологій землеробства полягає у оптимізації урожайності сільськогосподарських культур забезпечення екологічної складової якості сільськогосподарської продукції.*

*В рамках наукового дослідження нами пропонується вивчити та дослідити методу індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ), як найбільш оперативного та експресивний для вивчення та аналізу стану рослинності для промислових умов землеробства.*

*Поєднання цього методу із цифровими інформаційними та технологічним прогнозуванням, дасть змогу управління плановою врожайністю.*

*Тому основною метою роботи полягає у вивченні та дослідженні найбільш інтенсивного та експресивного методу індукції флуоресценції хлорофілу для оцінки стану сільськогосподарських культур в умовах промислового землеробства та поєднання цього методу з інноваційними технологіями цифрового землеробства, спрямованими на прогнозування і з рештою на кінцеву мету, на управління врожайністю.*

*Комплексна листову діагностика рекомендується для застосування не тільки для плодових та ягідних, але і для зернових, овочевих, кормових та декоративних культур.*

*Використання запропонованої технології дозволить проводити оперативний моніторинг агробіологічного стану сільськогосподарських угідь безпосередньо перед виконанням технологічної операції.*

*Ключові слова: Інформаційна система, ідентифікація, агробіологічний стан, сільськогосподарські угіддя, індукції флуоресценції нативного хлорофілу, наземний моніторинг.*

А.А. РОМАНОВ, О.В. ЦАРУК  
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України  
А.А. БРОВAREЦЬ  
Київський кооперативний інститут бізнесу і права

## **НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА «ФЛОРАТЕСТ» И ИДЕНТИФИКАЦИИ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР МЕТОДОМ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДУКЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НАТИВНОГО ХЛОРОФИЛЛА**

*В условиях стремительного роста населения нашей планеты и возникновения продовольственных кризисов в отдельных странах, земля превращается в стратегический ресурс, обеспечивающий экономическую безопасность и независимость любого государства. Именно для Украины, где земля является гарантом экономической стабильности и крупнейшим национальным богатством, рациональное ее использование и сохранение для будущих поколений является одним из крупнейших приоритетных направлений деятельности. В последние годы происходит интеграция органического, биологического, биодинамического, экстенсивного, интенсивного и to-till земледелия с современными технологиями, в частности с цифровыми информационно-техническими системами локального*

оперативного мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий. Последнее направление является актуальным и перспективным для условий природно-климатических зон Украины.

Один из главных подходов при применении цифровых технологий земледелия заключается в оптимизации урожайности сельскохозяйственных культур обеспечения экологической составляющей качества сельскохозяйственной продукции.

В рамках научного исследования нами предлагается изучить и исследовать метода индукции флуоресценции хлорофилла (ИФХ), как наиболее оперативного и экспрессивный для изучения и анализа состояния растительности для промышленных условий земледелия.

Сочетание этого метода с цифровыми информационными и технологическим прогнозированием, позволит управления плановой урожайностью.

Поэтому основной целью работы заключается в изучении и исследовании наиболее интенсивного и экспрессивного метода индукции флуоресценции хлорофилла для оценки состояния сельскохозяйственных культур в условиях промышленного земледелия и сочетание этого метода с инновационными технологиями цифрового земледелия, направленными на прогнозирование и с остальными на конечную цель, на управление урожайностью.

Комплексная листовая диагностика рекомендуется для применения не только для плодовых и ягодных, но и для зерновых, овощных, кормовых и декоративных культур.

Использование предлагаемой технологии позволит проводить оперативный мониторинг агробиологического состояния сельскохозяйственных угодий непосредственно перед выполнением технологической операции.

Ключевые слова: Информационная система, идентификация, агробиологический состояние, сельскохозяйственные угодья, индукции флуоресценции нативного хлорофилла, наземный мониторинг.

O.O. ROMANOV, O.V. TSARUK  
VM Cybernetics Institute Glushkov NAS of Ukraine  
O.O. BROVARETS  
Kyiv Cooperative Institute of Business and Law

#### NEED FOR LOCAL USE A RAPID MONITORING "FLORATEST" AGROBIOLOGICAL IDENTIFICATION AND CONDITION OF CROP BY INDUCTION NATIVE FLUORESCENCE OF CHLOROPHYLL

*With the rapid growth of our planet's population and the emergence of food crises in individual countries, land is turning into a strategic resource that ensures the economic security and independence of any state. For Ukraine, where land is the guarantor of economic stability and the greatest national wealth, its rational use and preservation for future generations is one of the highest priority areas of activity. In recent years, the integration of organic, biological, biodynamic, extensive, intensive and to-till agriculture with modern technologies, in particular with digital information and technical systems of local operational monitoring of agricultural land. The latter direction is relevant and promising for the natural and climatic zones of Ukraine.*

*One of the main approaches in the application of digital farming technologies is to optimize the yield of crops to ensure the environmental component of the quality of agricultural products.*

*As part of our research, we propose to study and investigate the method of chlorophyll induction of chlorophyll (IFH) as the most expeditious and expressive to study and analyze vegetation status for industrial farming conditions.*

*Combining this method with digital information and technology forecasting will help you manage your planned yield.*

*Therefore, the main purpose of the work is to study and study the most intensive and expressive method of induction of chlorophyll fluorescence in order to assess the condition of crops in industrial farming and to combine this method with innovative digital farming, aimed at forecasting and ultimately to final management.*

*Comprehensive leaf diagnosis is recommended for use not only for fruits and berries, but also for cereals, vegetables, fodder and ornamental crops.*

*The use of the proposed technology will allow the operational monitoring of the agrobiological state of agricultural land immediately before performing the technological operation.*

**Keywords:** Information system, identification, agrobiological status, agricultural land, fluorescence induction of native chlorophyll, ground monitoring.

#### Постановка проблеми

Сучасні технології агропромислового виробництва вимагають використання експрес методів для аналізу вмісту поживних речовин у рослині для визначення загального оперативного агробіологічного стану сільськогосподарських угідь. Існує велика кількість приладів для проведення експрес аналізу вмісту поживних речовин у ґрунті та рослині. Проте найбільш точним є визначення параметрів

поживних речовин лише лабораторним методом. Також варто відзначити що при проведенні технологічної операції сівби, аналіз необхідно попередньо проводити аналіз ґрунту (для забезпечення диференційованого внесення технологічного матеріалу у ґрунт), а у період вегетації – рослини (для забезпечення диференційованого внесення технологічного матеріалу на рослину).

Про те, якщо при визначенні вмісту поживних речовин у ґрунт, ми можемо мати запас часу для їх визначення та прийняття рішення, оскільки від моменту збору врожаю до моменту прийняття рішення, як правило, проходить від двох до дев'яти місяців до проведення наступної технологічної операції, чого цілком достатньо для проведення аналізу поживних речовин у ґрунті лабораторним методом протягом десяти днів. При визначенні вмісту поживних речовин у рослині у період вегетації, лабораторний метод є малоефективним, оскільки ми значно обмежені у часі, оскільки від моменту забору проб до прийняття рішення та виконання технологічної операції часом проходить навіть декілька годин. Тому ми обмежені у часі аналізу проб рослину, тому за цих умов лабораторний аналіз є мало дієвим, незважаючи на їх точність. Оскільки при проведенні аналізу вмісту поживних речовин у рослині у період вегетації ми не маємо запасу часу, так як при проведенні аналізу інформації про агробіологічний стан рослинності нам потрібно оперативно отримувати інформацію відразу перед виконанням технологічної операції по внесенню поживних речовин у ґрунт.

Тому виникає необхідність для розробки пристрою для локального оперативного моніторингу та ідентифікації агробіологічного стану сільськогосподарських культур. Найбільшу ефективність у цьому напрямку мають пристрою побудовані на методу індукції флуоресценції нативного хлорофілу (IFX).

#### Аналіз останніх досліджень

Проведемо аналіз пристроїв для локального оперативного моніторингу та ідентифікації агробіологічного стану сільськогосподарських культур методом індукції флуоресценції нативного хлорофілу. У 2014 було опубліковано статтю у форматі запитань і відповідей на серію флуоресцентних тематик індукції флуоресценції нативного хлорофілу [1]. Проте залишилося достатньо питань при практичному впровадженні у сучасних технологіях аграрного виробництва, зокрема у рослинництві для оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь. У даній роботі [1] ми розглядаємо питання про взаємозв'язок між швидкою флуоресценцією, вимірюваною з використанням флуориметрів, таких як PAM і HandyPEA, і затримкою флуоресценції, набагато слабшого кузену PF, що випромінюється у відповідь на реакції рекомбінації в PSII ; розподіл енергії; qP проти qL; аналіз декількох форм стресу з використанням Chl флуоресценції; область параметрів випробування JIP і FJ; наслідки флуоресценції, що випускається PSI для параметрів, таких як FV / FM; міркування при відборі дерев; призначення смуг флуоресценції; QTL досліджує на Chl флуоресцентно-пов'язані ознаки з точки зору флуоресценції і кілька інших тем.

*Що ж таке флуоресценція хлорофілу і чому ми його вивчаємо?* Флуоресценція (Chl) може бути визначена як червоне до далекого червоного світла, випромінюваного фотосинтетичними тканинами / організмами при освітленні світлом приблизно 400–700 нм (фотосинтетично активне випромінювання або PAR) [2]. У цьому спектрі синє і червоне світло збуджують хлорофіл ефективніше, ніж зелене світло. Хоча флуоресценція Chl являє собою лише невелику частку поглиненої енергії [приблизно 0,5–10%], її інтенсивність становить обернено пропорційна частці енергії, що використовується для фотосинтезу (окисно-відновний ефект) [3]. З цієї причини сигнал флуоресценції Chl може бути використаний в якості зонда для фотосинтетичної активності. У той же час, флуоресценція Chl також обернено пропорційна змінам дисипативного тепловиділення (ефект виходу, тобто збільшення виходу теплового випромінювання призводить до зменшення виходу випромінювання флуоресценції) [4], і, отже, Chl флуоресценція може бути використана також для моніторингу регуляторних процесів, що впливають на агробіологічний стан сільськогосподарських рослин та залежать від вмісту поживних речовин у рослині у певну фазу росту та розвитку рослин. Також на індукцію флуоресценції нативного хлорофілу у рослині впливають хвороби та шкідники, які сприяють її пригніченню, тому на це також потрібно звертати увагу.

Всі ці фактори, взяті разом, можуть перетворити Chl на флуоресценцію в нерозбірливий сигнал, але завдяки розробці специфічних протоколів, і за допомогою допоміжних методів, різні ефекти можуть розділитися, перетворюючи Chl флуоресценцію в потужний інструмент для дослідження фотосинтезу: гартівний аналіз [5], JIP тест [6; 7] тощо.

Відомий пристрій [8], який містить канал збудження і прийому флуоресценції та електронний блок. Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що пристрій аналог не дозволяє працювати з листям рослини, а також одержувати криву індукції флуоресценції, показники якої слугують діагностичними ознаками.

Найближчим по суті до запропонованого пристрою є прилад [9], який містить блок електронної обробки з цифровим індикатором на виході, клавіатурою на вході, з'єднаний з блоком живлення, який підключений до клавіатури, а також виносний оптичний датчик (сенсор), з'єднаний з входом блока

електронної обробки. Датчик включає джерело освітлення у вигляді лампи розжарення, затвор, синьо-зелений та червоний світлофільтри і фотоприймач.

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що вузли і зв'язки між ними у пристрої-прототипі обмежують його функціональні можливості: не дозволяють міняти режим освітленості, зокрема інтенсивність та імпульсне освітлення на фоні неперервного, в межах одного цикла вимірювань, не дозволяють одержати на індикаторі криву ІФХ для її аналізу, суттєво ускладнюють переорієнтацію пристрою на роботу з іншим стрес-чинником та детальний аналіз на ПЕОМ результатів багатьох циклів вимірювань.

Відомий пристрій [10], який полягає у реєстрації інфрачервоного поглинання листа рослини у спектральній області 850-1750 см у мінус першому ступені із швидкістю 160–400 см у мінус першому ступені/хв. Ураженням вважають зразок з максимальною інтенсивністю інфрачервоного поглинання в порівнянні із здоровою рослиною.

Спільними рисами аналогу і запропонованого способу є опромінення рослини, прийом та вимірювання оптичного сигналу, що взаємодіє з опроміненою областю листа. Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що спосіб-аналог не дозволяє ідентифікувати вірусну строкатість рослин.

Відомо імуно-ферментний [11], який полягає у зараженні рослин-індикаторів соком дослідних рослин з наступним визначенням ураженості рослин-індикаторів шляхом порівняння оптичних щільностей зразка і контролю. Спільними рисами аналогу і запропонованого способу є опромінення рослини, прийом та вимірювання оптичного сигналу, що взаємодіє з опроміненою областю листа. Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що спосіб-аналог потребує складного лабораторного обладнання, реактивів, багато часу (з рослиною-індикатором до 4 років) і не дозволяє здійснювати визначення *in Vivo* у польових умовах.

Відомий пристрій [12], який полягає у реєстрації інфрачервоного поглинання листа рослини у спектральній області 850-1750 см у мінус першому ступені із швидкістю 160-400 см у мінус першому ступені/хв. Ураженням вважають зразок з максимальною інтенсивністю інфрачервоного поглинання в порівнянні із здоровою рослиною.

Спільними рисами аналогу і запропонованого способу є опромінення рослини, прийом та вимірювання оптичного сигналу, що взаємодіє з опроміненою областю листа.

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що у способі-аналогі для діагностики використовуються незворотні структурні зміни клітин листка, які визначають по інфрачервоному поглинанню. Це не дозволяє здійснювати ранню діагностику за функціональними зворотними, змінами клітин листка.

Найближчим по суті до запропонованого способу є [13]. Спосіб полягає в опроміненні листка рослини, після темпової фази, світлом в діапазоні хвиль 400,650 нм, прийом вимірювання і реєстрацію сигналів наведеної флуоресценції в діапазоні хвиль 670,770 нм, із значень яких будують індукційну криву та визначають значення стаціонарної флуоресценції в області судини листка FTC та між судинами, того ж листка FTM і порівнюють ці значення, а по величині  $FTC1,5FTM$  рослину вважають ураженою вірусною строкатістю.

Спільними рисами способу - прототипу та запропонованого способу є опромінення листка рослини після темпової фази світлом в діапазоні довжин хвиль 400-650 нм, прийом, вимірювання і реєстрація сигналів флуоресценції в діапазоні довжин хвиль 670-770 нм із значень яких будують індукційну криву та визначають стаціонарну флуоресценцію  $F_{St}$ .

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що у способі - прототипу ідентифікують тільки вірусну строкатість і неможливо визначити інші вірусні ураження та загальну ураженість рослин вірусними інфекціями.

Відомо спосіб запису, інтерпретації та використання індукції флуоресценції нативного хлорофілу представлений у роботі Корнєв Д.Ю. [14].

Спосіб-аналог запису кривої індукції флуоресценції хлорофілу полягає в освітленні листа рослини в діапазоні хвиль 400-650 нм після його темпової адаптації, прийому та вимірюванні сигналів флуоресценції в діапазоні хвиль 670-770 нм та побудові індукційної кривої з поточних значень флуоресценції. У результаті вимірювання є реєстрація поточних значень флуоресценції з яких будують індукційну криву флуоресценції нативного хлорофілу.

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що у способі аналогу не визначені показники, які дозволяють ідентифікувати вірусну строкатість рослин.

Найближчим по суті до запропонованого способу [15], який полягає в одержанні і електронній реєстрації індукційної кривої, визначенні двох показників кривої, зокрема початкової  $F_0$  і максимальної  $F_m$  флуоресценції, та їх співвідношення, по якому і визначають стан рослини. Індукційну криву будують із поточних значень флуоресценції, одержаних при опроміненні листка рослини світлом у діапазоні хвиль 400, 650 нм, збуджуючим флуоресценцію хлорофілу, після попереднього опромінення коротким



насичуючим спалахом, темної фази, наступного прийому, виділення і вимірювання сигналів флуоресценції у діапазоні хвиль 670, 770 нм.

Відомим аналогом є спосіб ідентифікації карбонатного хлорозу рослин, згідно з яким, після проходження темної фази листки рослини опромінують світлом з довжиною хвилі в діапазоні 400-650 нм, приймають, вимірюють і реєструють сигнали флуоресценції в діапазоні довжин 5 хвиль 670-770 нм, із значень яких будують криву індукції флуоресценції з виділенням початкового  $F_0$  і максимального  $F_m$  значень флуоресценції, визначають ширину кривої індукції флуоресценції на рівні 0,75 ( $F_m - F_0$ ) для дослідної  $t_d$  і контрольної  $t_k$  рослин, а одержані значення порівнюють і при значенні  $t_d \geq t_k$  дослідну рослину вважають ураженою карбонатним хлорозом [16].

Найближчим відомим аналогом є спосіб визначення фізіологічного стану рослин методом індукції флуоресценції хлорофілу, відповідно до якого відбирають листки рослин, витримують у темряві, освітлюють та реєструють флуоресценцію шляхом співвідношення її інтенсивності і часу виміру, за величинами інтенсивності флуоресценції визначають нормальний або критичний фізіологічний стан рослин, значення інтенсивності флуоресценції  $F > 1$  вказує на нормальний фізіологічний стан, а  $F < 1$  - на критичний стан рослини [17]. Спільними ознаками відомого та запропонованого способу є відбір об'єктів досліджень, їх темнова адаптація, опромінення світлом, реєстрація флуоресценції та порівняння її значень, отриманих для рослин, що перебувають у різних екологічних умовах.

Спільними рисами аналогу і запропонованого способу є опромінення рослини, прийом та вимірювання оптичного сигналу, що взаємодіє з опроміненою областю листа. Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що спосіб-аналог не дозволяє ідентифікувати карбонатний хлороз рослин.

Відомо спосіб запису, інтерпретації та використання індукції флуоресценції нативного хлорофілу представлений у [18].

Спосіб-аналог запису кривої індукції флуоресценції хлорофілу полягає в освітленні листа рослини в діапазоні хвиль 400-650 нм після його темної адаптації, прийому та вимірюванні сигналів флуоресценції в діапазоні хвиль 670-770 нм та побудові кривої індукції флуоресценції хлорофілу з поточних значень флуоресценції.

Спільними рисами аналогу та запропонованого способу є вимірювання і реєстрація поточних значень флуоресценції з яких будують криву індукції флуоресценції нативного хлорофілу (ІФХ).

Найближчим по суті до запропонованого способу є [19].

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що у способі аналогу не визначені показники, які дозволяють ідентифікувати карбонатний хлороз.

Про те всі описані способи не відображають реального стану рослинності, а відповідно і агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, оскільки відсутня методика визначення і відображення вмісту у рослині поживних речовин, та не встановлено кореляційні залежності між останніми. Що і є предметом подальших досліджень.

### Мета дослідження

Дослідити необхідність та доцільність розробки та використання пристрою для локального оперативного моніторингу «Флоратест» та ідентифікації агробіологічного стану сільськогосподарських культур методом проведення індукції флуоресценції нативного хлорофілу.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Пристрій відноситься до галузі сільського господарства, орієнтований на локальний оперативний моніторинг агробіологічного стану посівів сільськогосподарських культур, зокрема у рослинництві, при впровадженні сучасних вискоєфективних технологій, селекційній роботі та технологіях локального оперативного моніторингу стану ґрунтового середовища, шляхом визначення фізичних властивостей та стану, (зокрема визначення ураженості рослин карбонатним хлорозом та іншими хворобами) шляхом запису і аналізу кривої індукції флуоресценції нативного хлорофілу рослинних об'єктів, бо карбонатний хлороз є індикатором цинкового та залізного голодування рослин і підвищеного РН ґрунту.

В основу покладена задача створення такого пристрою для контролю стану нативного хлорофілу, в якому завдяки введенню нових вузлів та змін функцій відомих стало б можливим розширення функціональних можливостей приладу, а саме міняти режими роботи сенсора, виносити на індикатор криву індукції флуоресценції хлорофілу, а також підключатись до ПК.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі діагностики стійкості рослин до абіотичного стресу методом індукції флуоресценції хлорофілу, для якого відібрані листки рослин проходять стадію темної адаптації, після чого в них збуджують флуоресценцію хлорофілу шляхом опромінювання світлом та порівнюють значення інтенсивності флуоресценції.

Визначають критичну концентрацію стресового агенту, шляхом порівняння критичних концентрацій стресових агентів для різних сортів визначають їх стійкість до модельної посухи та



засолення. Сорт є тим стійкішим, чим більшою для нього є критична концентрація стресового агенту, за якої максимум флуоресценції  $F_{\max}$  дослідної рослини є значно меншим, ніж  $F_{\max}$  контрольної рослини.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що пристрій містить сенсор блок електронної обробки, входом з'єднаний з блоком живлення, а виходом під'єднаний до індикатора, а також включає аналого-цифровий перетворювач, цифро-аналоговий перетворювач, блок управління та послідовний інтерфейс, причому, аналого-цифровий перетворювач з'єднано з виходом сенсора та першим входом блоку електронної обробки, цифро-аналоговий перетворювач з'єднано з управляючим входом сенсора та першим виходом блоку управління, у якого другий вихід з'єднано з блоком електронної обробки та другим входом аналого-цифрового перетворювача, перший вхід блоку управління з'єднаний з блоком живлення, а другий вхід з'єднаний з блоком електронної обробки, у якого третій вихід з'єднано з послідовним інтерфейсом.

Відмінними ознаками запропонованого пристрою є аналого-цифровий перетворювач, цифро-аналоговий перетворювач, блок управління та послідовний інтерфейс, причому, аналого-цифровий перетворювач з'єднано з виходом сенсора та першим входом блоку електронної обробки, цифро-аналоговий перетворювач з'єднано з управляючим входом сенсора та першим виходом блоку управління, у якого другий вихід з'єднано з блоком електронної обробки та другим входом аналого-цифрового перетворювача, перший вхід блоку управління з'єднано з блоком живлення, а другий вхід з'єднано з блоком електронної обробки, у якого третій вихід з'єднано з послідовним інтерфейсом.

Введення у пристрій нових вузлів, елементів та зв'язків дозволяє розширити функціональні можливості приладу, зокрема: управляти роботою сенсора, виносити на індикатор криву індукції флуоресценції хлорофіла, а також підключати пристрій до ПК.

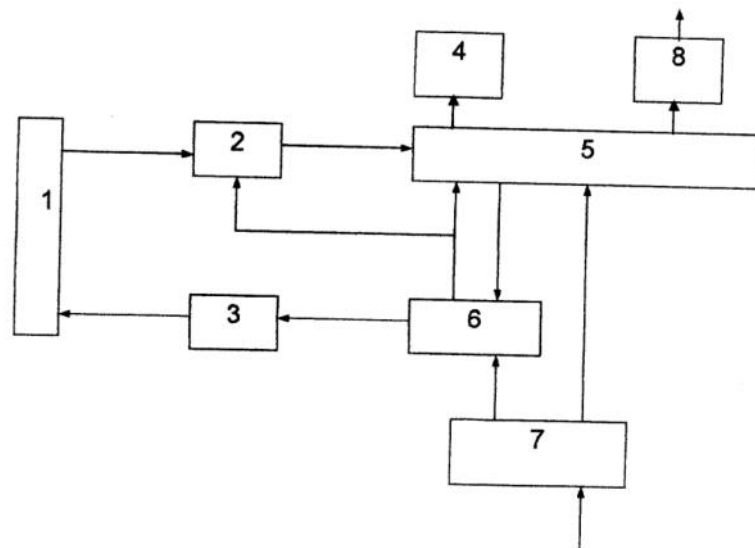


Рис. 1. Блок-схему запропонованого пристрою для локального оперативного моніторингу «Флоратест» індукції флуоресценції нативного хлорофілу.

На рис. 1 зображено блок-схему запропонованого пристрою. Вона містить блок електронної обробки 5, з'єднаний через аналого-цифровий перетворювач 2 з виходом сенсора 1, другим входом з'єднаний з блоком живлення 7, а вихід під'єднано до матричного індикатора 4, цифро-аналоговий перетворювач 3 з'єднаний з управляючим входом сенсора та першим виходом блоку управління 6, у якого другий вихід з'єднано з блоком електронної обробки 5 та другим входом аналого-цифрового перетворювача 2, перший вхід блоку управління з'єднано з блоком живлення 7, а другий вхід підключено до блоку електронної обробки 5, у якого третій вихід з'єднано з послідовним інтерфейсом 8.

Пристрій, зображений на рис. 1 пристрій працює наступним чином: Сенсор 1 закріплюють на листі рослини і включають блок живлення, який подає живлення на всі блоки. Після темнотної адаптації блок управління вмикає джерело випромінювання сенсора 1, подає команду на вимірювання до аналого-цифрового перетворювача та команду на запам'ятовування результату вимірювання до блоку електронної обробки 5. В сенсорі 1 джерело випромінювання освітлює лист рослини і збуджує флуоресценцію в межах плями освітлення. Оптичний сигнал флуоресценції перетворюється фотоприймачем сенсора в електричний сигнал. Цей сигнал поступає до аналого-цифрового перетворювача 2 і перетворюється в ньому у цифровий код. Поточні значення кодів, пропорційні флуоресценції нативного хлорофіла, поетапно переносяться до блоку електронної обробки 5 і запам'ятовуються в ньому. Якщо в процесі циклу вимірювань необхідно здійснити опромінення листа

імпульсами світла різної інтенсивності і тривалості то по реперним значенням сигналів флуоресценції, виділеним у блоці електронної обробки 5, блок управління 6 подає код на цифро-аналоговий перетворювач 3. Останній і змінює інтенсивність випромінювання джерела сенсора 1. Блок електронної обробки виділяє характеристичні значення флуоресценції такі як: початкове  $F_0$ , максимальне  $F_{\max}$  та усталене  $F_T$ , а також час напівнаростання флуоресценції 05, вираховує та запам'ятовує в межах цикла відношення  $(F_{\max}-F_0)/F_{\max}$ ,  $(F_{\max}-F_T)/F_{\max}$ . Результати вимірювань багатьох циклів зберігаються у блоці електронної обробки 5 і при необхідності можуть бути винесені на матричний індикатор 4 пошагово у цифровій формі, або весь цикл у вигляді кривої індукції флуоресценції хлорофіла. При необхідності детального аналізу багатьох циклів вимірювань результати з пам'яті блоку електронної обробки 5 переносять через послідовний інтерфейс 8 до ПЕОМ. Переорієнтацію пристрою на другий алгоритм роботи і розрахунків здійснюють шляхом заміни програми у блоці електронної обробки 5 з допомогою ПЕОМ через послідовний інтерфейс 8. Запропонований пристрій, як видно з його опису, може бути реалізований у виробничих умовах, так як для його реалізації використовується технічна база широкого призначення.

При реалізації пристрою як блок електронної обробки використано мікроконвертор ADuC812 (U.) фірми Analog Devices, графічний дисплей типу FDCG12864 фірми Fordata, DC/DC - перетворювач живлення та AC/DC - адаптер (ADP3810) - як первинне джерело живлення. АЦП і ЦАП - серійні мікросхеми, а блок управління реалізовано на стандартних дискретних мікросхемах.

Недоліком відомого способу є те, що, застосовуючи його, неможливо встановити стійкість рослин до стресового впливу та достовірно визначити власне природу стресу, оскільки у польових умовах або й при закладанні вегетаційних досліджень на рослину впливає безліч чинників, багато з яких можуть мати подібні фізіологічні прояви. Наведений спосіб дає можливість дослідити фізіологічний стан рослин у несприятливих екологічних умовах (наприклад посухи, цинкового та залізного голодування рослин, підвищеного показника рН ґрунту, забруднення важкими металами, обробки фізіологічно активними речовинами та ін.), однак, для його застосування є необхідним закладання певної площі ділянок рослин досліджуваного сорту та сорту-еталону з відомою стійкістю до стресу, проведення постійних метеорологічних спостережень та вивчення інших факторів довкілля, які впливають на рослини, проведення фенологічних обліків; або ж альтернативою є вегетаційні досліді, які також не завжди зручні у застосуванні.

Для створення умов штучної посухи у поживне середовище для культивування мікроклонів вносять 4-8 % осмотично-активної речовини поліетиленгліколю (ПЕГ 6000Да), пересаджують розвинені мікроклони на модифіковане середовище та на 7-8 день росту досліджують індуквану флуоресценцію хлорофілу листків. Визначення флуоресценції хлорофілу проводиться з допомогою пристрою для визначення нативного стану хлорофілу, наприклад хронофлуориметру "Флоратест" виробництва Інституту кібернетики НАН України, який використовується для дослідження індукції флуоресценції хлорофілу на живих листках рослин та фітопланктону [20]. Флуоресценцію вимірюють і сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур в середньому на 10-20 ц/га.

Спосіб прототипу полягає в одержанні і електронній реєстрації індукційної кривої індукції флуоресценції хлорофілу, визначенні двох показників кривої, зокрема початкової  $F_0$  і максимальної  $F_m$  флуоресценції, та їх співвідношення, по якому і визначають стан рослини. Криву індукції флуоресценції хлорофілу будують із поточних значень флуоресценції, одержаних при опроміненні листка рослини світлом у діапазоні хвиль 400, 650 нм, збуджуючим флуоресценцію хлорофілу, після попереднього опромінення коротким насичуючим спалахом, темної фази, наступного прийому, виділення і вимірювання сигналів флуоресценції у діапазоні хвиль 670, 770 нм.

Спільними рисами прототипу і запропонованого способу є опромінення листка рослини після темної фази світлом з довжиною хвилі 400, 650 нм, прийому, вимірюванні і реєстрації сигналів флуоресценції з довжиною хвилі 670, 770 нм, із значень яких будують криву індукції флуоресценції з виділенням початкового  $F_0$  і максимального  $F_m$  значень флуоресценції.

Причиною, що заважає одержанню очікуваного технічного результату є те, що у способі прототипу не визначені показники кривої індукції флуоресценції хлорофілу, які дозволяють ідентифікувати карбонатний хлороз рослин.

Задачею винаходу є вибір таких характерних ознак індукції флуоресценції хлорофілу, способу їх визначення та інтерпретації, які дозволяють ідентифікувати карбонатний хлороз рослин.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що запропонований спосіб включає опромінення листка рослини після темної фази світлом з довжиною хвилі 400, 650 нм, прийому, вимірюванні і реєстрації сигналів флуоресценції з довжиною хвилі 670, 770 нм, із значень яких будують криву індукції флуоресценції з виділенням початкового  $F_0$  і максимальної  $F_m$  значень флуоресценції, а також визначають ширину кривої індукції флуоресценції на рівні 0,75 ( $F_m-F_0$ ) для дослідної  $t_d$  і контрольної  $t_k$  рослин, а одержані значення порівнюють і при значенні  $td^2tk$  дослідну рослину вважають ураженою карбонатним хлорозом.

Відмінними ознаками запропонованого способу є те, що в ньому визначають ширину кривої індукції флуоресценції на рівні 0,75 ( $F_m - F_0$ ) для дослідної  $t_d$  і контрольної  $t_k$  рослин, а одержані значення порівнюють, і призначені  $td^2tk$  дослідну рослину вважають ураженою карбонатним хлорозом.

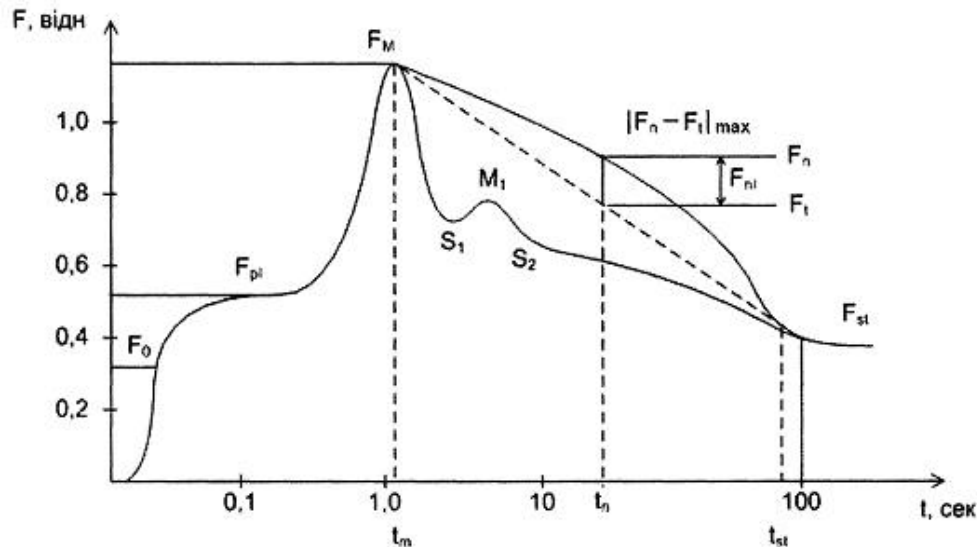


Рис. 2. Зображено загальний вигляд кривої індукції флуоресценції хлорофілу (індукційна крива, крива Каутського).

На рис. 2 зображено загальний вигляд кривої індукції флуоресценції хлорофілу (індукційна крива, крива Каутського) де значення флуоресценції представлені у відносних одиницях:

$F_0$  - початкове значення флуоресценції після початку опромінення;

$F_m$  - максимальне значення флуоресценції;

$F_m - F_0$  - варіабельна флуоресценція.

$t_1$  - час досягнення 0,75 варіабельної флуоресценції з боку наростання кривої індукції флуоресценції хлорофілу;

$t_2$  - час досягнення 0,75 варіабельної флуоресценції з боку падіння кривої індукції флуоресценції хлорофілу для контрольної рослини.

$t_3$  - час досягнення 0,75 варіабельної флуоресценції з боку падіння кривої індукції флуоресценції хлорофілу для дослідної рослини.

$t_k, t_d$  - ширина кривої індукції флуоресценції хлорофілу відповідно контрольної і дослідної рослини.

Введення у відомий спосіб операцій визначення ширини кривої індукції флуоресценції хлорофілу на рівні 0,75 варіабельної флуоресценції дослідної і контрольної рослин дозволить ідентифікувати ураженість рослин карбонатним хлорозом по збільшенню ширини кривої індукції флуоресценції хлорофілу дослідної рослини в порівнянні з шириною кривої індукції флуоресценції хлорофілу контрольної рослини більш ніж вдвічі.

Проміжок часу між точками  $t_1$  і  $t_2$  приймають за ширину кривої індукції флуоресценції хлорофілу на рівні 0,75 варіабельної флуоресценції для контрольної рослини  $t_k$ , а проміжок часу між точками  $t_1$  і  $t_2$  приймають за ширину кривої індукції флуоресценції хлорофілу для дослідної рослини  $t_d$ . При ураженості рослини карбонатним хлорозом, саме цей проміжок збільшується в порівнянні дослідної і контрольної рослин.

Відомо, що певні ділянки кривої індукції флуоресценції хлорофілу є індикаторами відповідних фізіологічних процесів у ланцюгу фотосинтезу, Тому порушення окремих ланок фотосинтезу, викликані екзо- та ендогенними чинниками проявляються у характерних змінах відповідних ділянок кривої індукції флуоресценції хлорофілу. Такі зміни кривої індукції флуоресценції хлорофілу дослідної рослини, на яку діє збуджуючий чинник у порівнянні з індукцією флуоресценції хлорофілу контрольної рослини на яку чинник не діє, свідчать про вплив чинника. Ідентифікація дії чинника потребує вибору специфічного показника кривої індукції флуоресценції хлорофілу якому відповідає дія саме цього чинника. Таким показником на основі експериментальних досліджень вибрано ширину кривої індукції флуоресценції хлорофілу на рівні 0,75 різниці максимального і початкове значень флуоресценції; тобто на рівні 0,75

варіабельної флуоресценції. Саме цей показник вибрано ідентифікаційною ознакою ураженості карбонатним хлорозом.

Запропонований спосіб реалізує наступний порядок визначень: з допомогою хронофлуориметра записують криву індукції флуоресценції хлорофілу контрольної рослини шляхом освітлення листа рослини після темпової фази, прийому, вимірювання та реєстрації сигналів флуоресценції.

Листок рослини витримують без доступу світла від 2 до 15 хв у конверті з темного паперу, або з допомогою виносного оптоелектронного сенсора, який має зажим із двома пластинами, між якими розміщують листок. Далі листок, чи його фрагмент, опромінюють світлом, яке збуджує флуоресценцію.

Опромінення листка рослини вибирають у діапазоні поглинання хлорофілу 400-650 нм, який охоплює головні  $\lambda=450$  нм,  $\lambda=650$  нм та проміжні  $\lambda=500$  нм,  $\lambda=550$  нм максимуми поглинання нативного хлорофілу. Інтенсивність опромінення активним світлом здійснюють у діапазоні 100-2000 мкмоль фотонів  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ , яка підтримує фотосинтез. Одночасно з освітленням здійснюють прийом, виділення, вимірювання і реєстрацію сигналів флуоресценції з освітленої плями листка в діапазоні довжин хвиль 670,770 нм. Цей діапазон охоплює обидва максимуми флуоресценції нативного хлорофілу на  $\lambda=680$  нм та  $\lambda=735$  нм. Із поточних значень флуоресценції будують криву індукції флуоресценції, виділяють початкове  $F_0$  та максимальне  $F_m$  значення флуоресценції і розраховують 0,75 варіабельної флуоресценції 0,75 ( $F_m - F_0$ ). З кривої індукції флуоресценції з боку наростання на рівні 0,75 варіабельної флуоресценції визначають  $t_1$ , з боку спаду кривої визначають  $t_2$ .

Введення у відомий спосіб операцій виділення значень стаціонарної флуоресценції, визначених в області судини листка та між судинами і їх порівняння дозволить ідентифікувати ураженість рослини вірусною строкатістю по збільшенню величини стаціонарної флуоресценції хлорофілу, визначеної в області судини в порівнянні з величиною стаціонарної флуоресценції, визначеної в міжсудинній області листка.

На рис. 3 схематично зображено листок рослини з точками вимірювань наведеної флуоресценції, де точки С і М відповідно області судин і між судинами.

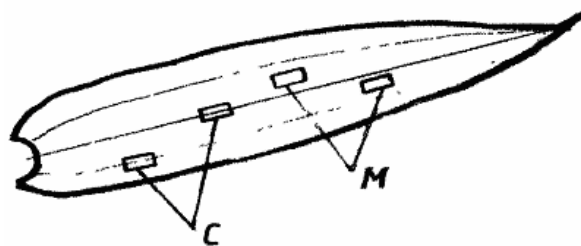


Рис. 3. Зображено загальний вигляд кривої індукції флуоресценції хлорофілу (індукційна крива, крива Каутського).

Ширину кривої індукції флуоресценції для контрольної рослини  $t$  визначають як  $t_k = t_2 - t_1$ . Аналогічно будують криву індукції флуоресценції хлорофілу з поточних значень флуоресценції дослідної рослини з підозрою на ураження хлорозом, і теж визначають ширину кривої індукції флуоресценції хлорофілу на рівні 0,75 варіабельної флуоресценції.

Якщо ширина кривої індукції флуоресценції хлорофілу дослідної рослини більша за ширину кривої індукції флуоресценції хлорофілу контрольної рослини більше ніж вдвічі ( $td^2tk$ ), то дослідну рослину вважають ураженою саме карбонатним хлорозом.

При реалізації способу був застосований переносний флуорометр «Флоратест» виробництва державного Науково-інженерного центру мікроелектроніки Інституту кібернетики НАН України, але можна використати інші прилади, наприклад, портативний хлорофіл-флуорометр PAM-2100 німецької фірми Heinz Walz GmbH, або хлорофілфлуорометр OS-30p фірми OPTI-Sciences, USA.

Запропонований спосіб реалізує наступний порядок визначень: з допомогою хронофлуориметра записують індукційну криву М (рис. 4) для міжсудинної зони М листка (рис. 5) рослини шляхом опромінення міжсудинної зони листа рослини після темпової фази, прийому, вимірювання та реєстрації сигналів флуоресценції. Листок рослини витримують без доступу світла від 2 до 15 хв у конверті з темного паперу, або з допомогою виносного оптоелектронного сенсора, який має зажим із двома пластинами, між якими розміщують листок.

Далі міжсудинний фрагмент листка опромінюють світлом, яке збуджує флуоресценцію хлорофілу.

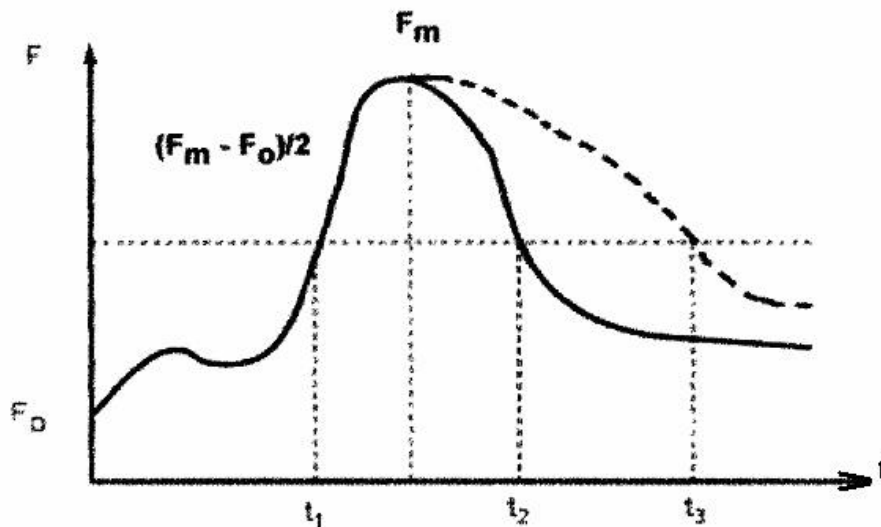


Рис. 4. Зображено загальний вигляд кривої індукції флуоресценції хлорофілу (індукційна крива, крива Каутського).

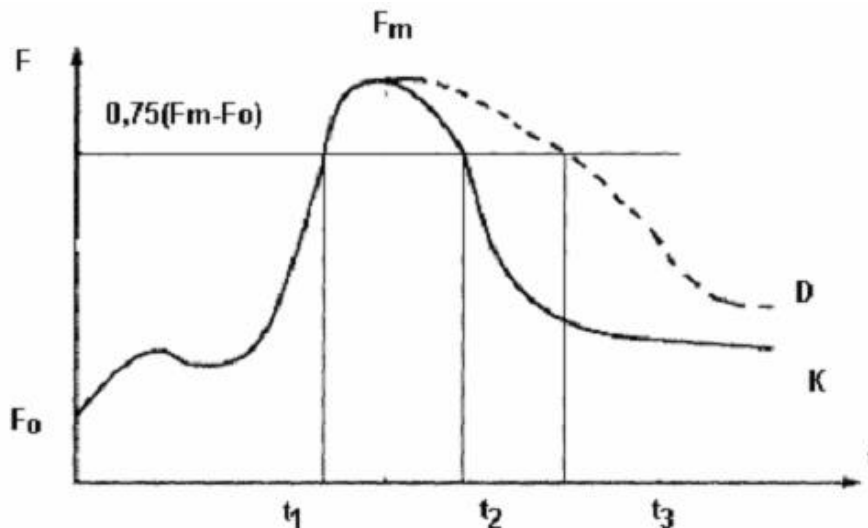


Рис. 5. Зображено загальний вигляд кривої індукції флуоресценції хлорофілу (індукційна крива, крива Каутського).

На рис. 3 зображено загальний вид індукційної кривої (крива індукції флуоресценції хлорофілу, крива Каутського) де значення флуоресценції представлено у відносних одиницях: С - хід індукційної кривої для області судини; М - хід індукційної кривої для міжсудинної області; FТС - значення усталеної флуоресценції для області судини; FТМ - значення усталеної флуоресценції для міжсудинної області.

Відомо, що певні ділянки кривої індукції флуоресценції хлорофілу є індикаторами відповідних фізіологічних процесів у ланцюгу фотосинтезу.

Тому порушення окремих ланок фотосинтезу, викликані екзо та ендогенними чинниками проявляються у характерних змінах відповідних ділянок індукційної кривої. Такі зміни індукційної кривої дослідної рослини, на яку діє збуджуючий чинник у порівнянні з індукційною кривою контрольної рослини на яку чинник не діє, свідчать про вплив чинника. Ідентифікація дії чинника потребує вибору специфічного показника індукційної кривої якому відповідає дія саме цього чинника. Такими показниками в результаті експериментальних досліджень вибрано значення стаціонарної флуоресценції визначені в міжсудинній області листка FТМ, як контроль і в області судини FТС, як в зоні ураження. Саме ці показники вибрано ідентифікаційною ознакою ураженості вірусною строкатістю.

Частіше довжину хвилі опромінення вибирають у діапазоні поглинання хлорофілу 400,650нм, який охоплює головні  $\lambda=450$  нм,  $\lambda=650$  нм та проміжні  $\lambda=500$  нм,  $\lambda=550$  нм максимуми поглинання нативного хлорофілу. Інтенсивність опромінення активічним світлом здійснюють у діапазоні 100,2000 мкмоль фотонів  $m^{-2} s^{-1}$ , яка підтримує фотосинтез. Одночасно з освітленням здійснюють прийом, виділення, вимірювання і ресстрацію сигналів флуоресценції з освітленої плями листка в діапазоні довжин хвиль 670,770 нм. Цей діапазон охоплює обидва максимуми флуоресценції нативного хлорофілу



на  $\lambda=680$  нм та  $\lambda=735$  нм. Із поточних значень флуоресценції будують індукційну криву флуоресценції і виділяють значення стаціонарної флуоресценції (FTM, рис. 4).

Аналогічно будують індукційну криву (С. рис. 4) флуоресценції хлорофілу з поточних значень флуоресценції для області судини листка (С. рис. 5) і виділяють значення стаціонарної флуоресценції (FTC, рис. 4). Виділені значення FTC і FTM порівнюють. Якщо  $F_{TC} > 1,5 F_{TM}$ , то рослину вважають ураженою вірусною строкатістю.

В залежності від конструкції сенсорної частини приладу, яка включає джерело опромінення, світлофільтр та фотоприймач, застосовують послідовне, при одноканальній конструкції сенсора, або паралельне, при двоканальній конструкції сенсора, вимірювання наведеної флуоресценції. При одноканальній конструкції оптичну вісь сенсора спочатку орієнтують на міжсудинну область листка і записують індукційну криву, а потім переміщують сенсор, орієнтуючи його оптичну вісь на область судини і знову записують індукційну криву. При застосуванні двоканального сенсора оптичні вісі каналів орієнтовані паралельно відповідно на області судин і між судинами. Перевагами паралельного вимірювання флуоресценції при двоканальній конструкції сенсора є однакові темнові фази та умови вимірювань.

Задачею пристрою є вибір таких характерних ознак індукції флуоресценції нативного хлорофілу, способу їх визначення та інтерпретації, які дозволяють виявити загальний вміст поживних речовин у рослинні та забезпеченість ними, а відповідно і загальний агробіологічний стан сільськогосподарських угідь.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що запропонований спосіб включає опромінення листка рослини, після темної фази, світлом в діапазоні хвиль 400-650 нм, прийом, вимірювання та реєстрацію сигналів наведеної флуоресценції в діапазоні хвиль 670-770 нм, із значень яких будують індукційну криву флуоресценції та визначають стаціонарну флуоресценцію  $F_{st}$  а також в ньому додатково визначають значення фонові  $F_0$ , максимальної  $F_m$  і варіабельної флуоресценції  $F_m - F_0$ , та значення флуоресценції плато  $F_{pl}$ , а також визначають максимальне значення модуля різниці між поточними значеннями флуоресценції повільної фази  $F_n$  та відповідним йому значенням межах від максимального  $F_m$  до стаціонарного  $F_{st}$  значень і по величині коефіцієнта плато  $K_{pl} = (F_{pl} - F_0) : (F_m - F_0) 0,4$  та коефіцієнта нелінійності  $K_{nl} = |F_n - F_{pl}| \max : (F_m - F_{st}) 0,1$  роблять висновок про вірусне ураження рослини.

Відмінними ознаками запропонованого способу є те, що в ньому додатково визначають значення фонові  $F_0$ , максимальної  $F_m$  і варіабельної флуоресценції  $F_m - F_0$ , та значення флуоресценції плато  $F_{pl}$ , а також визначають максимальне значення модуля різниці між поточними значеннями флуоресценції повільної фази  $F_n$  та відповідним йому значенням лінійного спаду флуоресценції  $F_t$  визначеного для моменту вимірювання  $F_n$  в межах від максимального  $F_m$  до стаціонарного  $F_{st}$  значень і по величині коефіцієнта плато  $K_{pl} = (F_{pl} - F_0) : (F_m - F_0) 0,4$  та коефіцієнта нелінійності  $K_{nl} = |F_n - F_t| \max : (F_m - F_{st}) 0,1$  роблять висновок про вірусне ураження рослини.

Введення у відомий спосіб визначення коефіцієнта плато швидкої фази флуоресценції та коефіцієнта нелінійності повільної фази індукції флуоресценції, способу їх визначення та кількісної інтерпретації дозволяє роботи робити висновок про вірусне ураження рослини.

Сутність запропонованого способу полягає в тому, що лист рослини, або його фрагмент, спочатку витримують у темряві. Темнова фаза листка рослини необхідна для приведення системи фотосинтезу в початковий стан, коли окисно-відновлювальні ланки електрон-транспортних ланцюгів відкриті. Тривалість темної фази від 3 до 20 хв впливає на точність визначення показників індукції флуоресценції. Темнова фаза менша 3хв. ускладнює визначення флуоресценції плато  $F_{pl}$  та стаціонарної флуоресценції  $F_{st}$ , а збільшення темної фази більше за 20 хв суттєво зменшує швидкість вимірювань. Для надійних визначень характерних показників при експресних обстеженнях достатньо темної адаптації не менше 3хв.

Далі лист рослини, або фрагмент опромінюють світлом, яке збуджує флуоресценцію хлорофілу.

Збудження флуоресценції хлорофілу виконують у спектральному діапазоні його поглинання, тобто в діапазоні фотосинтетично активної радіації (ФАР) від 390 до 730 нм. В цьому діапазоні існують два основні максимуми поглинання нативного хлорофілу на хвилях 430 і 660 нм та два слабо виражених (500 і 600нм). За межами цього діапазону збудження флуоресценції хлорофілу взагалі малоефективне. Крім того, інші пігменти рослин, що поглинають світло і передають енергію на реакційні центри хлоропластів, характеризуються максимумами поглинання у тому ж діапазоні. При збудженні флуоресценції на хвилях більше 650нм виникають значні суто технічні труднощі при виділенні сигналів флуоресценції у діапазонах хвиль від 670 до 770 нм на фоні збуджувачого опромінення, оскільки в цьому випадку потрібні вузькосмугові світлофільтри. Вибираючи хвилю збудження флуоресценції нативного хлорофілу, враховують, з одного боку, максимум поглинання ( $\lambda = 430$  нм), а з іншого, технічні складнощі виділення сигналу флуоресценції на фоні опромінення, тобто 650 нм. Тому оптимальним для збудження флуоресценції хлорофілу є діапазон від 400 до 650 нм. Джерелами збудження можуть слугувати сонячне

проміння, ртутна лампа або лампа розжарення з відповідним фільтром, а також суперяскраві світлодіоди з необхідною довжиною хвилі.

Далі приймають сигнали наведеної флуоресценції. Флуоресценцію хлорофілу спостерігають в усьому діапазоні хвиль від 670 до 770 нм з вираженими максимумами на 680 та 730 нм. На хвилі 680 нм її пов'язують здебільшого з роботою фото-системи II, а флуоресценцію на хвилі 730 нм - з фотосистемою I. Тому вимірювання флуоресценції в усьому діапазоні від 670 до 770 нм посередньо охоплює роботу обох фотосистем фотосинтезу. Сигнали флуоресценції на фоні опромінення виділяють з допомогою спектральних приладів, зокрема світлофільтрів з відповідною смугою пропускання від 670 до 770 нм, наприклад, скляних або майларових. Прийом оптичних сигналів флуоресценції та перетворення їх для подальшого вимірювання в сигнали електричні здійснюють з допомогою фотоприймачів, якими слугують фотоелектронні перемножувачі або напівпровідникові фоточутливі елементи, зокрема фотодіоди чи фототранзистори.

Далі прийняті сигнали флуоресценції вимірюють і реєструють. Із поточних значень флуоресценції будують індукційну криву (Fig.) і визначають стаціонарну флуоресценцію.

Індукована флуоресценція хлорофілу проходить фазу швидкої флуоресценції (до 3 сек) (рис. 4, рис. 5) в якій виділяють фонову флуоресценцію  $F_0$ , значення плато  $F_{pl}$ , максимальну флуоресценцію  $F_m$ , варіабельну флуоресценцію  $F_m - F_0$  (між  $F_0$  та  $F_m$ ), та повільну фазу флуоресценції (рис. 5) - спад після максимального значення  $F_m$ , в якій виділяють стаціонарне значення  $F_{st}$ . Хід флуоресценції в повільній фазі в межах від  $F_m$  до  $F_{st}$  для неуразених рослин увігнутий або опуклий. Такий хід можна апроксимувати прямою лінією між максимальним  $F_m$  та стаціонарним  $F_{st}$  значеннями.

Характерні значення флуоресценції  $F_0$ ,  $F_{pl}$ ,  $F_m$  та  $F_{st}$  визначають з індукційної кривої (рис. 5), або шляхом порівняння ряду послідовних зареєстрованих значень флуоресценції. Так умовою визначення фонові початкової флуоресценції  $F_0$ , є  $F_i - F_{i-1} F_{i+1} - F_i$  або мінімум другої похідної від індукційної кривої (рис. 4). Флуоресценцію плато  $F_{pl}$  визначають як зменшення наростання флуоресценції за умовою  $F_j - F_{j-1} F_{j+1} - F_j$  або по мінімуму першої похідної. Умовою визначення максимальної флуоресценції з ряду поточних значень є  $F_n - 1 F_n > F_{n+1}$ . Стаціонарне значення флуоресценції визначають за умови  $F_k - F_{k+10,01} F_m$ . Значення  $F_i$ ,  $F_j$ ,  $F_n$  та  $F_k$  - відповідно послідовні поточні значення флуоресценції зареєстровані за цикл вимірювання. Характерні значення індукції флуоресценції визначають в кінці циклу вимірювань або у процесі вимірювань в залежності від обчислювальних можливостей вимірювального пристрою.

Відомо, що певні ділянки індукції флуоресценції нативного хлорофілу інтактного листка рослини корелюють з відповідними ланками ланцюгу фотосинтезу, тому можуть слугувати діагностичними ознаками порушень фотосинтетичного процесу. В результаті експериментальних досліджень в якості діагностичних ознак ураженості рослин вірусними інфекціями вибрано порушення у відновлені пулу первинних акцепторів реакційних центрів фотосистеми II, які визначають шляхом вимірювання флуоресценції плато  $F_{pl}$  в межах варіабельної флуоресценції  $F_0$   $F_m$ . Поява проміжного плато  $F_{pl}$  в швидкій фазі флуоресценції викликане блокуванням електронного транспорту між первинними акцепторами фотосистеми II під впливом різних чинників, зокрема вірусними ураженнями хлоропластів. Збільшення  $F_{pl}$  використовують для оцінки ступеню інгібування електронного транспорту, тобто як діагностичну ознаку впливу вірусного ураження. Другою діагностичною ознакою вибрано порушення ходу гальмування відтоку електронів від первинних акцепторів реакційних центрів фотосистеми II до реакційних центрів фотосистеми I в ланцюгу темпової фази фотосинтезу, яку оцінюють шляхом визначення максимальної нелінійності повільної фази індукції флуоресценції, як максимального значення модулю різниці поточного значення флуоресценції та флуоресценції лінійного спаду в момент часу  $t_n$ .

Лінійний спад флуоресценції в повільній фазі індукції флуоресценції свідчить про блокування окремих ланок в ланцюгу фотосинтезу, зокрема затримка активації циклу Кельвіна, відтоку електронів до фотосистеми I та ін., викликане вірусними ураженнями хлоропластів. Ступінь наближення реальної функції спаду повільної фази індукції флуоресценції до лінійного спаду в межах від  $F_m$  до  $F_{st}$  вибрано для оцінки ступеню порушення фотосинтезу, а тим самим ступеню вірусного ураження рослини. Оцінку нелінійності реальної функції спаду флуоресценції здійснюють по величині максимальної нелінійності.

Максимальна нелінійність виражає максимальне відхилення ходу реальної залежності, увігнутої або опуклої, від лінійної залежності монотонного спаду флуоресценції в межах від максимального  $F_m$  до стаціонарного  $F_{st}$  значень, тобто від апроксимуючої прямої між значеннями  $F_m$  та  $F_{st}$ .

**Основними напрямками при створенні пристрою для локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь є:**

– створення інформаційних технологій автоматизованого проектування комп'ютерних засобів і систем для перетворення та обробки інформації недетермінованої природи;

– розробка комп'ютерних засобів та біосенсорних приладів для екологічного моніторингу, експрес-діагностики стану рослин та виявлення гострих вірусних інфекцій.

**Найважливіші результатом отриманими в ході дослідження:**

- створено теоретичні основи та методологію проектування високопродуктивних засобів перетворення і обробки інформації;
- розроблено теоретичні основи та структурні принципи побудови віртуальних центрів автоматизованого проектування із централізованим і розподіленим доступом;
- розроблено методологію створення нових інформаційних технологій віртуального проектування комп'ютерних приладів та засобів для аналізу й обробки інформації про стан складних біологічних об'єктів;
- розроблено та запроваджено державні стандарти з відмовостійкості й живучості засобів обчислювальної техніки, таймерних систем, аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів, форматів обміну біометричними даними та засобів біометричної ідентифікації.

В рамках дисертаційної роботи нами пропонується вивчити та дослідити методу індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ), як найбільш оперативного та експресивний для вивчення та аналізу стану рослинності для промислових умов землеробства (рис. 6).



Рис. 6. "Флоратест" - прилад для функціональної діагностики стану рослин в польових умовах.

Поєднання цього методу із цифровими інформаційними та технологічним прогнозуванням, дасть змогу управління плановою врожайністю.

Тому основною метою роботи полягає у вивченні та дослідженні найбільш інтенсивного та експресивного методу індукції флуоресценції хлорофілу для оцінки стану сільськогосподарських культур в умовах промислового землеробства та поєднання цього методу з інноваційними технологіями цифрового землеробства, спрямованими на прогнозування і з рештою на кінцеву мету, на управління врожайністю.

Пропонується експрес-діагностика функціональних та інфекційних захворювань рослин, що відповідає світовій тенденції супроводу технологій вирощування сучасним інструментальними методами аналізу функціонального стану рослин.

В основу системи комплексної діагностики покладені методичні та інструментальні прийоми вимірювання та інтерпретації діагностичних ознак, зокрема характерних значень фото- та термоіндукції флуоресценції нативного хлорофілу листків, спектральних показників флуоресценції, які дозволяють надійно і експресно діагностувати функціональні захворювання, а також визначати присутність в рослинах вірусних та бактеріальних інфекцій та виявляти їх у прихованій формі.

Комплексна листкова діагностика рекомендується для застосування не тільки для плодових та ягідних, але і для зернових, овочевих, кормових та декоративних культур [1].

Високий врожай дають лише ті сільськогосподарські рослини, які культивуються в належних, сприятливих для них умовах. Різкі зміни температури повітря, його підвищення (або, навпаки, зниження) вологість і забрудненість шкідливими промисловими викидами є чинниками, що негативно впливають на процеси вегетації та плодоношення. За умов дії цих чинників важливо своєчасно розпізнати зміни стану тієї чи іншої рослини, щоб додатково підживити її вологою або добривами чи обробити гербіцидами. Проте оскільки негативні внутрішні зміни не завжди одразу позначаються на зовнішньому вигляді агрокультури, створено прилад «Флоратест», який дає змогу точно визначати стан рослини за особливостями перебігу в ній процесу фотосинтезу.

Традиційні методики визначення стану рослини передбачають реєстрацію й аналізування флуоресценції (світіння внаслідок опромінення) хлорофілу в зеленому листі та потребують для цього спеціальних лабораторних умов. А прилад «Флоратест» може здійснювати експрес-діагностування буквально впродовж лічених секунд (режим і тривалість операції можна обрати в окремому меню): до листка рослини прикріплюється мініатюрний датчик-«прищіпка», далі листок освітлюють у визначеному світловому діапазоні, а спеціальна інтелектуальна програма здійснює оброблення отриманої інформації та передає результат на дисплей – у вигляді кривої лінії, що має назву кривої Каутського, яку умовно порівняти можна порівняти з кардіограмою. На основі цих даних, які відображають стан рослини у конкретний часовий проміжок, користувач приладу отримує дані про вміст поживних речовин у рослині, а з використанням програмного забезпечення можна приймати рішення щодо подальшого догляду за рослиною та норми внесення технологічного матеріалу.

Експрес-діагностування стає у пригоді й при боротьбі з бур'янами: якщо візуально рослина-бур'ян має задовільний вигляд, а крива Каутського свідчить про початок процесів в'янення, то це, відповідно, унеможливає внесення гербіцидів, адже бур'ян загине у природний спосіб. Таким чином, заощаджуються хімічні речовини, а довкілля зазнає меншого техногенного навантаження.

Пристрій «Флоратест», вимагає подальших досліджень, аби він відображав стан рослини, а програмне забезпечення створене на основі таких даних, давало конкретні поради щодо норми внесення технологічного матеріалу та періодів. На даному етапі також працюють над створенням бездротових сенсорних мереж, що уможливають дистанційне спостереження за розвитком рослин на великих територіях [2].

На сьогодні прилад "Флоратест" випускається у вигляді сенсорної мережі, що дозволяє прискорити процес збору та опрацювання даних.

Основні області застосування експресна оцінка життєдіяльності рослин після засухи, морозу, зчеплення, внесення пестицидів експрес-визначення оптимальних доз хімічних добрив та біологічних добавок, що дає змогу оптимізувати кількість добрив і добавок та зменшити вміст нітратів в овочах експресне визначення забруднення води, ґрунтів і повітря пестицидами, важкими металами і промисловими викидами економія енергетичних і водних ресурсів при штучному поливі створення технології прецизійного землеробства при страховому землеробстві прилад дозволяє отримати прогнозні результати щодо майбутнього урожаю автоматизація досліджень в області фізіології рослин.

### Висновки

Прилад «Флоратест» для експрес-діагностики стану рослин в умовах дії стресових навантажень природного і техногенного походження, які дозволяють своєчасно вжити запобіжних заходів і, як наслідок, врятувати рослини від хвороб, зберегти врожай, підвищити продуктивність рослинних культур і скоротити витрати на виробництво одиниці продукції, знизити вміст шкідливих речовин в рослинах, що особливо важливо в умовах прецизійного землеробства.

Технічний результат використання пристрою «Флоратест» виражається у отриманні точної, достовірної та швидкої оцінки стійкості рослин винограду до ґрунтової посухи та засолення, що має важливе значення при проведенні селекційних робіт, зокрема в селекції стійких до абіотичного стресу сортів винограду та для оцінки стійкості перспективних форм та сортів.

У результаті огляду встановлено необхідність та доцільність розробки та використання пристрою для локального оперативного моніторингу «Флоратест» та ідентифікації агробіологічного стану сільськогосподарських культур методом проведення індукції флуоресценції нативного хлорофілу.

### Список використаної літератури:

1. Kalaji MH (2011) The impact of abiotic stress factors on the fluorescence of chlorophyll in plants of selected varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.). Warsaw University of Life Sciences SSGW, Warsaw, (in Polish).
2. McCree KJ (1972) The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meterol* 9:191–216.
3. Duysens LNM, Sweers HE (1963) Mechanisms of two photochemical reactions in algae as studied by means of fluorescence. In: *Studies on microalgae and photosynthetic bacteria, special issue of plant and cell physiology*. Japanese Society of Plant Physiologists, University of Tokyo Press, Tokyo, pp 353–372. 1963.
4. Krause GH, Jahns P (2004) Non-photochemical energy dissipation determined by chlorophyll fluorescence quenching: characterization and function. In: GC Papageorgiou, Govindjee (eds) *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis, advances in photosynthesis and respiration*, vol 19. Springer, Berlin, pp. 463–495.
5. Bradbury M, Baker NR (1981) Analysis of the slow phases of the in vivo chlorophyll fluorescence induction curve. Changes in the redox state of photosystem II electron acceptors and fluorescence emission from photosystems I and II. *Biochim Biophys Acta* 635:542–551.



6. Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: the JIP test. In: Mathis P (ed) Photosynthesis: from light to biosphere, vol V. Kluwer, Dordrecht, pp 977–980.
7. Strasser RJ, Tsimilli-Michael M, Srivastava A (2004) Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In: Papageorgiou G, Govindjee (eds) Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis, advances in photosynthesis and respiration. Springer, Dordrecht, pp 321–362.
8. Способ определения концентрации хлорофила и устройство для его осуществления" СССР №1659797, GOIN21/69.
9. Фотометр переносний ИФХ-1 ТУ ИВБЦ.201113.001 П2. Київ. 1993.
10. Способ обнаружения вирусных инфекций растений SU 1507253; A01G 67/00, G01N 21/35. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
11. Способ тестирования растений на вирусы; патент RU 2147173. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
12. Способ обнаружения вирусных инфекций растений А.С. SU 1507253; A01G67/00, G01N21/35. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
13. Спосіб ідентифікації вірусної строкатості рослин», патент UA 83679, 11.08.2008. Бюл. №5. 2008р. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
14. Информационные возможности индукции флуоресценции хлорофилла, Киев, Альтерпрес, 2002.
15. Спосіб реєстрації та використання світлоіндукованих вимірювань флуоресценції хлорофілу», патент DD 300049, A7 GO1N 21/64. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
16. Патент України № 82894 C2, G01N 21/64, A01G 7/00, 2006. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
17. Патент України № 24908 U, G01N 21/64, 2006. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
18. роботі Корнеев Д.Ю. «Информационные возможности индукции флуоресценции хлорофилла», Киев, Альтерпрес, 2002. с.15-28.
19. Спосіб реєстрації та використання світло індукованих вимірювань флуоресценції хлорофілу, патент DD 300049, A7, G01N21/64. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.
20. Патент України №. 12382 U, G01N 21/64, 2006. МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с.

#### References (transliterated)

1. Kalaji MH (2011) Vplyv abiotychnykh faktoriv stresu na fluorestsentsiyu khlorofilu v roslynakh vybranykh sortiv yachmenyu (Hordeum vulgare L.). Varshavs'kyi universytet nauk pro zhyttya SSGW, Varshava, (pol'skoyu movoyu).
2. McCree KJ (1972) Spektr diyi, pohlynannya ta kvantovyy vykhid fotosyntezy u kul'turnykh roslynakh. Ahri Meterol 9: 191–216.
3. Duysens LNM, Sweers HE (1963) Mekhanizmy dvokh fotokhimichnykh reaktsiy u vodorostyakh, doslidzheni za dopomohoyu fluorestsentsiyi. V: Doslidzhennya mikrovdorostey ta fotosyntetychnykh bakteriy, spetsial'na problema fiziolohiyi roslyn ta klityn. Yapons'ke tovarystvo fiziolohiv roslyn, Universytet Tokio Pres, Tokio, s. 353–372 1963 r.
4. Krause GH, Jahns P (2004) Nefotokhimichne rozsiyuvannya enerhiyi, shcho vyznachayet'sya hasinnyam fluorestsentsiyi khlorofilom: kharakter ta funktsiya. U: GC Papageorgiou, Govindjee (eds) Khlorofil fluorestsentsiyi: pidpys fotosyntezy, prohres u fotosyntezi ta dykhanni, t. 19. Sprynher, Berlin, s. 463–495.
5. Bradbury M, Baker NR (1981) Analiz povil'nykh faz induktsiynoyi kryvoyi induktsiyi khlorofil'noyi fluorestsentsiyi. Zminy v vidnovnomu stani aktseptoriv elektroniv fotosystemy II ta vyprominyuvannya fluorestsentsiyi z fotosystem I ta II. Biochim Biophys Acta 635: 542–551.
6. Vymiryuvannya shvydkykh fluorestsentnykh perekhidnykh protsesiv dlya vyrishennya ekolohichnykh pytan': test JIP V: Mathis P (red.) Fotosyntezy: vid svitla do biosfery, t. V. Klyuver, Dordrekht, S. 977–980.
7. Strasser RJ, Tsimilli-Maykl M, Srivastava A (2004) Analiz khlorofilu na perekhidnyy fluorestsentsiyu. V: Papageorgiou G, Govindjee (eds) Khlorofil fluorestsentsiyi: pidpys fotosyntezy, prohres u fotosyntezi ta dykhanni. Sprynher, Dordrekht, s. 321–362.
8. „Sposoby vyznachennya kontsentratsiyi khlorofilu ta prystroyu dlya yoho zdiysnennya” SRSR №1659797, GOIN21 / 69.
9. "Fotometr perenosnyy IFKH-1" TU IVBTS.201113.001 P2 Kyiv 1993.



10. «Sposoby vyyavlennya virusnykh infektsiynykh roslyn» SU 1507253; A01G 67/00, G01N 21/35.
11. «Sposoby testuvannya roslyn na virusy»; patent RU 2147173.
12. «Sposoby vyyavlennya virusnykh infektsiy roslyn» A.S. SU 1507253; A01G67 / 00, G01N21 / 35.
13. «Spetsial'nyy identyfikatsiynyy kod nayriznomanitnishykh strokiv», patent UA 83679, 11.08.2008. Byul. №5. 2008r.
14. «Informatsiyni mozhlyvosti induktsiyi fluorestsentsiyi khlorofilu», Kyev, Al'terpres, 2002h.
15. «Spetsializatsiya tsentralizatsiyi ta vykorystannya svitovykh produktyvnykh fluorestsentsiy khlorofilu», patent DD 300049, A7 G01N 21/64.
16. Patent Ukrayiny № 82894 S2, G01N 21/64, A01G 7/00, 2006r.
17. Patent Ukrayiny № 24908 U, G01N 21/64, 2006.
18. Rich Kornyejev D.YU. «Informatsiyni mozhlyvosti industriyi fluorestsentsiyi khlorofilu», Kyiv, Al'terpres, 2002r., St.15-28.
19. «Spetsializatsiya tsentralizatsiyi ta vykorystannya svitlykh indukovanykh fluorestsentsiy khlorofilu», patent DD 300049, A7, G01N21 / 64.
20. Patent Ukrayiny №. 12382 U, G01N 21/64, 2006.

УДК 515.18 + 621.372.542

Д.Н.СВИНАРЕНКО

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ ИХ РЕАЛИЗАЦИЙ

*Предложен метод представления распределений интенсивностей многомерных цифровых сигналов на целочисленных ортогональных решетках произвольного числа измерений. На этой основе развит метод совмещения отдельных реализаций таких сигналов, представленных различными слоями решеток. Метод обеспечивает повышение разрешающей способности распределений интенсивностей первичных сигналов с контролируемым уровнем информативности и сохранение схожести геометрических форм распределений интенсивности исходных сигналов в синтезированных сигналах.*

*Ключевые слова:* многомерный цифровой сигнал, пространственное разрешение, информационная энтропия, ортогонализация, совмещение данных, индекс структурной схожести.

Д.М.СВИНАРЕНКО

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### ПОКРАЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ АНАЛІЗУ БАГАТОВИМІРНИХ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ОРТОГОНАЛІЗАЦІЇ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЙ

*Запропоновано метод подання розподілів інтенсивностей багатовимірних цифрових сигналів на цілочислових ортогональних решітках довільної кількості вимірів. На цій основі розвинений метод суміщення окремих реалізацій таких сигналів, поданих різними шарами решіток. Метод забезпечує збільшення роздільної здатності розподілів інтенсивностей первинних сигналів з контрольованим рівнем інформативності та збереження схожості геометричних форм розподілів інтенсивності вихідних сигналів у синтезованих сигналах.*

*Ключові слова:* багатовимірний цифровий сигнал, просторове розрізнення, інформаційна ентропія, ортогоналізація, суміщення даних, індекс структурної схожості.

D.M.SVYNARENKO

Oles Honchar Dnipro National University

### RESOLUTION ENHANCEMENT OF THE ANALYSIS OF MULTIDIMENSIONAL DIGITAL SIGNALS BASED ON ORTHOGONALIZATION OF THEIR IMPLEMENTATIONS

*The article is devoted to the resolution enhancement of multidimensional digital signals of arbitrary physical nature for the increasing the informational significance of such signals.*

*The method of informational representation of multidimensional digital signals, defined on the orthogonal integer lattices with layers representing separate implementations of such signals is offered. The set of signal implementations is described by indicator function of its accessory to a lattice and presented in the form of the modeling matrix presented by concatenation of columns, each of which represents a projection of corresponding realization of a signal to a sublattice of smaller dimension. Statistical independence of multidimensional digital signal implementations is realized by singular value decomposition of a modeling matrix. Definition of the most informative implementations is carried out by the analysis of square informational entropies of an unitary matrix columns with dimension of the used projections and generated as a result of singular value decomposition. Further the auxiliary matrix is formed by replacement of a generated unitary matrix column with the maximum square informational entropy by a normalized linear combination of other columns of orthogonalized matrix. Resolution enhancement is realized by the subsequent reconstruction of the signal by transformation reverse to the used singular value decomposition. It is shown that the offered method provides high level of structural similarity index of the initial and synthesized signals.*

*Efficiency of the offered method is confirmed by results of the analysis the multispectral digital images of remote sensing, comparative analysis of structural similarity indexes' values of the initial and synthesized signals, and also by the cards of structural similarity.*

*Results of work may be used at the thematic analysis of multidimensional digital signals of the various physical nature and pattern recognition.*

*Keywords:* Multidimensional digital signal, resolution, informational entropy, orthogonalization, data fusion,, structural similarity index.

### Постановка проблемы

Значительное количество приложений связано с анализом и обработкой многомерных цифровых сигналов (МЦС). В ряде приложений такой характер сигналов обусловлен способом их формирования (в частности, многоспектральные цифровые изображения дистанционного зондирования, представленные в растровых форматах). Применительно к радиотехническим сигналам такое их представление связано со стремительным развитием цифровых технологий, в рамках которых радиотехнический сигнал представляется в дискретизированном и квантованном (оцифрованном) виде. Существенное влияние на возможности обнаружения, анализа и оценки параметров таких сигналов оказывает наличие помех (шумов), неизбежно присутствующих при формировании и передаче сигналов, множество реализаций которых определяет их многомерный характер.

Вопросам анализа и тематической интерпретации цифровых сигналов посвящено значительное количество работ как теоретического, так и прикладного характера. Соответствующие результаты ограничены заданием МСЦ на плоских и трехмерных целочисленных решетках. Поэтому представляет интерес развитие общей методики анализа таких сигналов (независимо от их размерности) и на этой основе – разработке методов увеличения их информационной значимости.

### Анализ последних исследований и публикаций

Большинство методов увеличения информационной значимости МЦС реализуют различные варианты концепции совмещения данных (Data Fusion), впервые в общем виде сформулированной в работе [1] и понимаемой как интеграция множественных данных, представляющих объект обработки и полученных различными способами, с целью формирования тематической информации, более полной, чем полученной отдельными источниками данных. В прикладном плане цель совмещения данных состоит в повышении их разрешающей способности – различимости дискретизированных распределений интенсивностей первичных сигналов. Наиболее существенные результаты получены применительно к двумерным сигналам (в виде изображений и волновых полей) на основе вейвлет-технологий их обработки [2-4], сводящейся к совмещению разномасштабных первичных данных.

Среди иных методов увеличения разрешающей способности МЦС, который также ограничен анализом двумерных сигналов, отметим технологии сверхразрешения [5-7].

Реализация обоих указанных подходов требует перемасштабирования либо передискретизации первичных сигналов и сопровождается неустраняемой ошибкой интерполяции.

### Цель исследования

Цель статьи – разработка метода увеличения информационной значимости (разрешающей способности) многомерных цифровых сигналов, заданных на ортогональных целочисленных решетках, посредством совмещения информационных характеристик их реализаций, представленных слоями решеток.

### Изложение основного материала исследования

Примем, что значения многомерного цифрового сигнала (МЦС) заданы на прямоугольной ортогональной целочисленной решетке  $n \times m \times k$  и описываются индикаторной функцией  $\mathbf{G}_{n,m,k}$ . Каждая  $i$ -проекция МЦС ( $i = \overline{0, k-1}$ ) на двумерную решетку  $n \times m$  представляет собой его отдельную реализацию и содержит информацию о физическом состоянии объекта, представленного индикаторной функцией  $\mathbf{G}_{n,m,k}$ .

Представим  $\mathbf{G}_{n,m,k}$  матрицей  $\mathbf{Q}_{n \cdot m \times k}$ , каждый столбец которой получен посредством упорядочения по ее строкам/столбцам  $k$ - проекции МЦС на двумерную решетку  $n \times m$ ; столбцы представляют проекции решетки при  $i = \overline{0, k-1}$ . Далее рассматриваем указанную матрицу как конкатенацию  $k$  векторов:  $\mathbf{Q}_{n \cdot m \times k} = [\mathbf{x}_{n \cdot m \times 1}^{(1)}, \mathbf{x}_{n \cdot m \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{n \cdot m \times 1}^{(r)}, \dots, \mathbf{x}_{n \cdot m \times 1}^{(k)}]$ .

Важнейшей характеристикой сигналов является их разрешающая способность, которая может быть оценена ее квадратичной энтропией [8]. Пусть наиболее информативной реализации МЦС

соответствует столбец  $r$  матрицы  $\mathbf{Q}_{n \cdot m \times k}$ . Сформируем вектор  $\mathbf{w}_{n \cdot m \times 1}^{(r)} = \sum_{\substack{i=1 \\ (i \neq r)}}^{n \cdot m} q_{n \cdot m, i} / (n \cdot m - 1)$ , где

$q_{n-m,i}$  - элементы матрицы  $Q_{n-m \times k}$ , заменив им  $r$ -й столбец матрицы  $Q_{n-m \times k}$  :  
 $\bar{Q}_{n-m \times k} = [X_{n-m \times 1}^{(1)}, X_{n-m \times 1}^{(2)}, \dots, W_{n-m \times 1}^{(r)}, \dots, X_{n-m \times 1}^{(k)}]$ .

Следуя методике [9], перейдем к ортогонализированному представлению образованной матрицы на основе ее сингулярного разложения,  $\bar{Q}_{n-m \times k} = \bar{U}_{n-m \times k} \cdot \bar{S}_{k \times k} \cdot \bar{V}_{k \times k}^T$ , где  $\bar{U}_{n-m \times k} = [Y_{n-m \times 1}^{(1)}, Y_{n-m \times 1}^{(2)}, \dots, Y_{n-m \times 1}^{(r)}, \dots, Y_{n-m \times 1}^{(k)}]$  - матрица с ортогональными столбцами, что обеспечивает декорреляцию реализаций МЦС и как следствие - возможность их независимой обработки. Отметим, что этот метод обеспечивает, как показали многочисленные вычислительные эксперименты, наименьшие значения попарных скалярных произведений столбцов матрицы  $\bar{Q}_{n-m \times k}$  в евклидовом пространстве в сравнении с другими вычислительными алгоритмами ортогонализации [10].

На завершающем этапе предлагаемого метода увеличения информативности МЦС формируется новая матрица  $\bar{U}_{n-m \times k} = [Y_{n-m \times 1}^{(1)}, Y_{n-m \times 1}^{(2)}, \dots, X_{n-m \times 1}^{(r)}, \dots, Y_{n-m \times 1}^{(k)}]$  (як отмечалось выше, вектор  $X_{n-m \times 1}^{(r)}$  представляет наиболее информативную реализацию МЦС) с последующим обратным преобразованием  $\bar{Q}_{n-m \times k} = \bar{U}_{n-m \times k} \cdot \bar{S}_{k \times k} \cdot \bar{V}_{k \times k}^T$ .

Далее приведен пример реализации предложенного метода применительно к многоспектральным растровым изображениям дистанционного зондирования. На рисунках 1 – 6 представлены первичные растровые изображения, зафиксированные одновременно в шести спектральных каналах излучения – носителя видовой информации с различными пространственными разрешениями (15 м. для изображений рис. 1-3, 30 м. для изображений рис. 4-6).



Рис. 1. Изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм



Рис. 2. Изображение спектрального канала 0.63 мкм – 0.69 мкм



Рис. 3. Изображение спектрального канала 0.78 мкм – 0.86 мкм

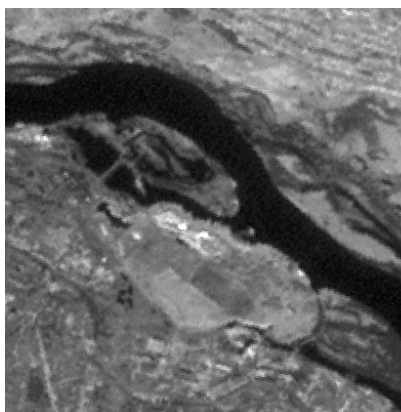


Рис. 4. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм

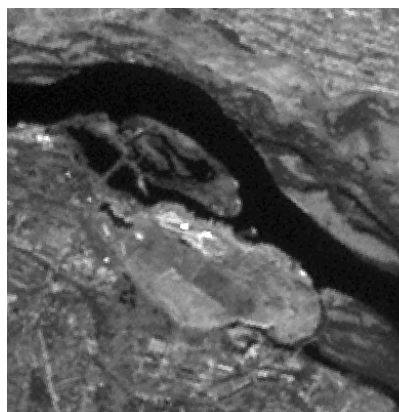


Рис. 5. Изображение спектрального канала 2.295 мкм – 2.365 мкм

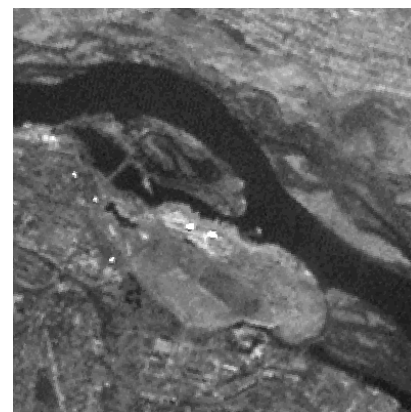


Рис. 6. Изображение спектрального канала 2.360 мкм – 2.430 мкм

Значения энергетических энтропий представленных изображений приведены в таблице 1.

Таблица 1

|  | Изображения |
|--|-------------|
|--|-------------|



|               | Рис. 1 | Рис. 2 | Рис. 3 | Рис. 4 | Рис. 5 | Рис. 6 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Энтропия, бит | 5.3014 | 4.8102 | 4.7334 | 4.6756 | 4.6700 | 4.3531 |

Как следует из данных таблицы, наибольшей информативностью обладает изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм, наименьшей – изображении спектрального канала 2.360 мкм – 2.430 мкм.

На рисунках 7 - 9 представлены изображения спектральных каналов 2.235 мкм – 2.285 мкм, 2.295 мкм – 2.365 мкм, 2.360 мкм – 2.430 мкм, сформированные предложенным методом.



Рис. 7. Трансформированное изображение канала 2.235 мкм – 2.285 мкм



Рис. 8. Трансформированное изображение канала 2.295 мкм – 2.365 мкм



Рис. 9. Трансформированное изображение канала 2.360 мкм – 2.430 мкм

Сравнение изображений, представленных на рисунках 4 - 6 и на рисунках 7 - 9 свидетельствует о существенном повышении разрешающей способности последних. Увеличение их информационной значимости подтверждается данными таблицы 2, в которой представлены соответствующие значения информационных энтропий.

Таблица 2

| Энтропия, бит | Изображения |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | Рис. 4      | Рис. 5 | Рис. 6 | Рис. 7 | Рис. 8 | Рис. 9 |
|               | 4.6756      | 4.6700 | 4.3531 | 4.4236 | 4.7521 | 4.8324 |

Для анализа схожести распределений первичных МЦС и сигналов, синтезированных предложенным методом, используем аналог индекса структурной схожести (ИСС), предложенного в работе [11], определив его для пары сравниваемых цифровых изображений  $\mathbf{A}_{n \times m}$ ,  $\mathbf{B}_{n \times m}$  соотношением

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{i,j} - \langle \mathbf{A} \rangle) \cdot (b_{i,j} - \langle \mathbf{B} \rangle)}{\|\mathbf{A}_{n \times m} - \langle \mathbf{A} \rangle\|_2 \cdot \|\mathbf{B}_{n \times m} - \langle \mathbf{B} \rangle\|_2},$$

где  $a_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$  - элементы соответствующих матриц; угловыми скобками обозначено среднее значение массивов;  $\|\cdot\|_2$  - норма Фробениуса. Отметим, что в силу своего определения величина  $S$  принадлежит интервалу  $[0, 1]$  и возрастает с увеличением меры структурной схожести изображений, представленных массивами  $\mathbf{A}_{n \times m}$  и  $\mathbf{B}_{n \times m}$ .

В таблице 3 приведены индексы структурной схожести между парами изображений, приведенных на рисунках 4-6 (обладающие наименьшим пространственным разрешением), и соответствующими синтезированными изображениями (рисунки 7-8).

Таблица 3

| ИСС | Изображения |        |        |        |        |        |
|-----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | Рис. 4      | Рис. 7 | Рис. 6 | Рис. 8 | Рис. 7 | Рис. 9 |
|     | 0.8344      |        | 0.8464 |        | 0.8842 |        |



Данные таблицы свидетельствуют о высоком уровне схожести этих изображений. Отметим возрастание индексов структурной схожести с уменьшением информативности (разрешающей способности) первичных изображений, что существенно для тематического анализа синтезированных МЦС.

На рисунках 10 - 12 представлены карты структурной схожести наименее информативных исходных изображений, приведенных на рисунках 4 – 6, и соответствующих синтезированных изображений (рисунки 7 – 9), представляющие распределения локальных значений индекса структурной схожести по полю изображения. Карты структурной схожести построены по методике работы [11] и приведены в BW-формате; черным цветом показаны конфигурации соответственных геометрических объектов.

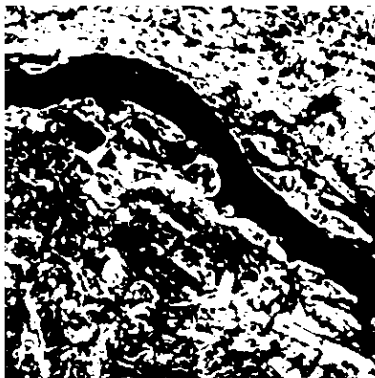


Рис. 10. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм и его синтезированного изображения

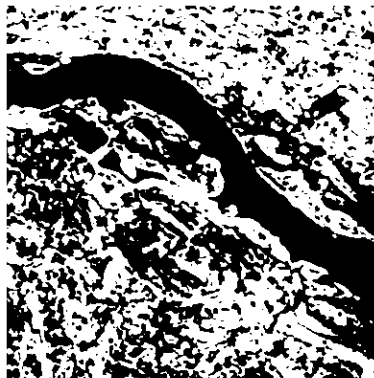


Рис. 11. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.295 мкм – 2.365 мкм и его синтезированного изображения



Рис. 12. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.360 мкм – 2.430 мкм и его синтезированного изображения

Как и данные таблицы 3, приведенные карты свидетельствуют о сохранении информации о геометрических формах объектов, представленных на первичных и синтезированных изображениях.

### Выводы

В работе предложен новый эффективный метод представления и анализа многомерных цифровых сигналов различной физической природы. Метод обеспечивает совмещение отдельных реализаций таких сигналов в едином объекте с повышенными характеристиками информационной значимости, включая пространственную разрешающую способность, при высокой степени схожести исходных и синтезированных сигналов.

### Список использованной литературы

1. Mahler R. Optimal/robust distributed data fusion: a unified approach. *Proceedings of SPIE*. 2000. Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition, № 4. P. 128-138.
2. Даджион Р., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов / пер. с англ. под ред. ЛюП.Ярославского, Москва, 1988. 488 с.
3. Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C.A. Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005. № 43(6). P. 1391–1402.
4. Волошин В.И., Корчинский В.М. Повышение информативности видовых данных дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*. 2006. Том 12, № 5/6. С. 15-16.
5. Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Москва, 2017. 160 с.
6. Sangeetha M., Senthilrajan H. Super Resolution – A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2016 Vol. 4, №, 21. P.1-5.
7. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. / пер. с англ. А.Ю.Линовича и др.. Москва,.: 2012. 720 с.
8. Габидулин Э.М., Пилипчук Н.И. Лекции по теории информации. Москва, 2007. 214 с.
9. Корчинский В.М. Многомерное векторное представление распределений яркости многоспектральных растровых изображений дистанционного зондирования Земли. *Вестник Херсонского национального технического университета*, 2014. № 3 (50). С. 90-93.

10. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing / Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Singular Value Decomposition*. New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, 2007. P. 65-74.
11. Wang Z., Bovik A.K., Sheikh H.R., Simoncelli E.R. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004, Vol. 13, № 4. P. 600-612.

#### Spisok ispolzovannoy literaturyi

1. Mahler R. Optimal/robust distributed data fusion: a unified approach. *Proceedings of SPIE*. 2000. Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition, #. 4. R. 128-138.
2. Dadzhion R., Mersero R. Tsifrovaya obrabotka mnogomernykh signalov / per. s angl. pod red. Lyu P. Yaroslavskogo, Moskva, 1988. 488 s.
3. Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C.A. Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005. # 43(6). R. 1391–1402.
4. Voloshin V.I., Korchinsky V.M. Povyshenie informativnosti vidovykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. 2006. Tom 12, # 5/6. S. 15-16.
5. Timanovskiy A.L., Pirogov Yu.A. Sverhrazreshenie v sistemakh passivnogo radiovideniya. Moskva, 2017. 160 s.
6. Sangeetha M., Senthilrajan H. Super Resolution – A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2016 Vol. 4, #, 21. P.1-5.
7. Smit S. Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. / per. s angl. A.Yu. Linovicha i dr.. Moskva, 2012. 720 s.
8. Gabidulin E.M., Pilipchuk N.I. Lektsii po teorii informatsii. Moskva, 2007. 214 s.
9. Korchinskiy V.M. Mnogomernoe vektornoe predstavlenie raspredeleniy yarkosti mnogospektralnykh rastrovnykh izobrazheniy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014. # 3 (50). S. 90-93.
10. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing / Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Singular Value Decomposition*. New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, 2007. P. 65-74.
11. Wang Z., Bovik A.K., Sheikh H.R., Simoncelli E.R. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004, Vol. 13, #, 4. P. 600-612.

УДК 004.9, 004.428.4

Н.О. СОКОЛОВА, А.С. БЕЛОВ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТА РОБОЧОГО МІСЦЯ

У сучасному світі професійна діяльність багатьох людей пов'язана з роботою за комп'ютером, але в процесі своєї роботи люди мало приділяють увагу контролю показників мікроклімата. Перевищення допустимих показників цих параметрів впливають на працездатність людини. В статті наведений опис інформаційної системи моніторингу робочого місця, яка слідує за показниками мікроклімата робочого місця, таких як температура, рівень освітлення, вуглецевого газу, відносна вологість повітря, атмосферний тиск, накопичує ці дані на сервері, надає можливість перегляду даних у режимі онлайн та повідомляє користувача про зміни основних показників. Система побудована на мікроконтролерах, які наявні у вільному доступі з використанням платформи Arduino та інтегрованого середовища розробки Arduino IDE – безкоштовного кроссплатформного середовища розробки. Опитування мікроконтролера Arduino, який зв'язується із комп'ютером через віртуальний COM порт, відбувається за допомогою функцій із бібліотеки pyserial Python. Для колекціонування даних використовується сервер Things Speak із базою даних та інтерфейсом для отримання даних від автономних систем та різних приладів, які можуть собою створювати інтернет речей (IoT). ThingSpeak також має службу платформи аналітики IoT, яка дозволяє агрегувати, візуалізувати та аналізувати потоки поточних даних у хмарі. Для полегшення інформування користувачів у систему інтегрований Telegram-бот, який у разі використання його на комп'ютері буде під час роботи виводити повідомлення, які користувач не зможе пропустити та відреагувати на критичні значення показників мікроклімата. Основна ідея використання бота - це можливість для користувача отримати дані з будь-якого сенсору системи простими командами в месенджері, а також віддалено запустити або зупинити роботу системи моніторингу. Система пройшла успішне тестування як система розумного робочого місця, після невеликої доробки вона може бути використана для контролю інших показників, а також адаптована під використання в інших проектах, наприклад, розширена не тільки для моніторингу, але й для контролю параметрів мікроклімата, а також інтегрована в системи розумного будинку.

Ключові слова: arduino; інформаційна система; розумне робоче місце; telegram бот; розумний будинок; мікроконтролер.

Н.О. СОКОЛОВА, А.С. БЕЛОВ

Дніпровский национальный университет имени Олеся Гончара

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА РАБОЧЕГО МЕСТА

В современном мире профессиональная деятельность многих людей связана с работой за компьютером, но в процессе своей работы люди мало уделяют внимания контролю показателей микроклимата. Превышение допустимых показателей этих параметров влияет на работоспособность человека. В статье приведено описание информационной системы мониторинга рабочего места, которая следит за показателями микроклимата рабочего места, такими как температура, уровень освещения, углекислого газа, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, накапливает эти данные на сервере, предоставляет возможность просмотра данных в режиме онлайн и сообщает пользователя об изменениях основных показателей. Система построена на микроконтролерах, имеющиеся в свободном доступе с использованием платформы Arduino и интегрированной среды разработки Arduino IDE - бесплатной кроссплатформенной среды разработки. Опросы микроконтроллера Arduino, который связывается с компьютером через виртуальный COM порт, происходит с помощью функций из библиотеки pyserial Python. Для коллекционирования данных используется сервер Things Speak с базой данных и интерфейсом для получения данных от автономных систем и различных приборов, которые могут собой создавать интернет вещей (IoT). ThingSpeak также имеет службу платформы аналитики IoT, которая позволяет агрегировать, визуализировать и анализировать потоки текущих данных в облаке. Для облегчения информирования пользователей в систему интегрирован Telegram-бот, который в случае использования его на компьютере будет во время работы выводить сообщения, пользователь не сможет пропустить его и отреагировать на критические значения показателей микроклимата. Основная идея

использования бота - это возможность для пользователя получить данные с любого сенсора системы простыми командами в мессенджере, а также удаленно запустить или остановить работу системы мониторинга. Система прошла успешное тестирование как система умного рабочего места, после небольшой доработки она может быть использована для контроля других показателей, а также адаптирована под использование в других проектах, например, расширена не только для мониторинга, но и для контроля параметров микроклимата, а также интегрирована в системы умного дома.

Ключевые слова: *arduino*; информационная система; умный рабочее место; *telegram* бот; умный дом; микроконтроллер.

N.O. SOKOLOVA, A.S. BIELOV  
Oles Honchar Dnipro National University

### INFORMATION SYSTEM MONITORING OF MICROCLIMATE OF THE WORKPLACE

*In the modern world, the professional activity of many people is connected with working at a computer, but in the course of their work, people pay little attention to the control of microclimate indicators. Exceeding the permissible values of these parameters affects the human performance. The article describes the workplace monitoring information system, which monitors the microclimate of the workplace, such as temperature, light level, carbon dioxide, relative air humidity, atmospheric pressure, accumulates this data on the server, provides the ability to view data online and reports user about changes in key indicators. The system is built on microcontrollers that are freely available using the Arduino platform and the Arduino IDE integrated development environment - a free cross-platform development environment. Arduino microcontroller polling, which communicates with a computer through a virtual COM port, is performed using functions from the pyserial Python library. For collecting data, a Things Speak server with a database and an interface is used to retrieve data from autonomous systems and various devices that the Internet of Things (IoT) can create. ThingSpeak also has an IoT analytics platform service that allows you to aggregate, visualize and analyze current data flows in the cloud. To facilitate informing users in the system, a Telegram-bot is integrated, which, if used on a computer, will display messages during operation, the user will not be able to skip it and react to critical values of the microclimate indicators. The basic idea behind using a bot is to allow the user to get data from any system sensor through simple commands in the messenger, and to remotely start or stop the monitoring system. The system was successfully tested as a smart workplace system, after a small refinement it can be used to control other indicators, as well as adapted for use in other projects, for example, expanded not only for monitoring, but also for monitoring microclimate parameters, as well as integrated into smart home systems.*

*Keywords: arduino; information system; clear workplace; telegram bot; smart house; microcontroller.*

### Постановка проблеми

Моніторинг значень мікроклімату робочого місця – один із важливих моментів ефективної роботи. Слідкування за показниками забезпечує створення необхідних умов, які не будуть знижувати імунітет, не будуть заважати працівникам, підвищуючи їх працездатність. На даний момент велику увагу приділяють мікроклімату виробничих приміщень, розроблені санітарні норми для виробничих приміщень та кабінетів інформатики [1-3]. Якщо для виробничих приміщень є вартісні корпоративні рішення, які дозволяють контролювати основні показники, то контроль показників у кабінетах інформатики покладається на вчителя, а для індивідуального робочого місця за комп'ютером таких систем майже не існує, тому є актуальним розробка такої системи моніторингу, яка буде корисна в першу чергу для тих, хто працює вдома та школярів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В сегменті недорогих побутових систем мікроклімату відсутні системи, які можуть контролювати одночасно такі показники як температура, рівень освітленості та вуглецевого газу, атмосферний тиск, відносна вологість повітря.

Вопесо X200 датчик мікроклімату – вимірює лише температуру та вологість, немає можливості збору даних. Для зручності експлуатації передбачена індикація вологості і температури, яка відображається на РК-дисплеї. Датчики серії LOVEHOME ACADEMY – можливість вимірювання температури, вологості та якості повітря (сигаретний дим, побутовий газ, чадний і вуглецевий газ і т.д.). Є можливість встановлення системи оповіщення людини через смс, звукову або світлову сигналізацію. Ціна залежить від об'єкта, робиться тільки на замовлення.

Універсальний датчик мікроклімату Broadlink E-Air A1 – вимірювання шуму, температури, вологості, якості повітря (суміш газів таких як сигаретний дим, побутовий газ, чадний і вуглецевий газ і т.д). Можливість перегляду даних через додаток на телефон. Неможливо колекціонувати дані.

#### Формулювання цілей статті

Була поставлена задача створення бюджетної за ціною інформаційної системи, яка дозволяє контролювати одночасно температуру, відносну вологість повітря, атмосферний тиск, рівень освітленості та вуглецевого газу, колекціонувати ці дані, при необхідності їх візуалізувати та аналізувати, а також повідомляти користувача про небезпечний рівень якогось з показників.

#### Основна частина

Значення параметрів мікроклімату суттєво впливають на самопочуття та працездатність людини і, як наслідок цього, рівень травматизму. Тривала дія високої температури повітря при одночасно підвищеній його вологості призводить до збільшення температури тіла людини до 38–40 °С (гіпертермія), внаслідок чого здійснюються різноманітні фізіологічні порушення в організмі: зміни в обміні речовин, у серцево-судинній системі, зміни функцій внутрішніх органів (печінки, шлунка, жовчного міхура, нірок), зміни у системі дихання, порушення центральної та периферичної нервових систем.

Негативна дія високої температури збільшується при підвищеній вологості, оскільки при цьому знижується інтенсивність процесу випаровування поту, тобто погіршується тепловіддача від тіла людини. Зміни в організмі за підвищеної температури відображаються на працездатності людини: так, збільшення температури повітря виробничого середовища з 20°C до 35°C призводить до зниження працездатності людини на 50-60%.

Для моніторингу була створена наступна система (рисунок 1). Апаратна частина (АП) складається з сенсорів та мікроконтролера для їх опитування. Програмна частина (ПЧ) складається з персонального комп'ютера для відправки даних на сервер, серверу для колекціонування даних та телеграм боту, який виконує усі запити від користувача по значенню сенсорів та виконує моніторинг значень вуглецевого газу та освітлення. Та останній компонент програмної частини – прилади користувача, це може бути ноутбук, планшет, телефон, тощо. Головне, щоб на пристрої був встановлений додаток месенджера Telegram.

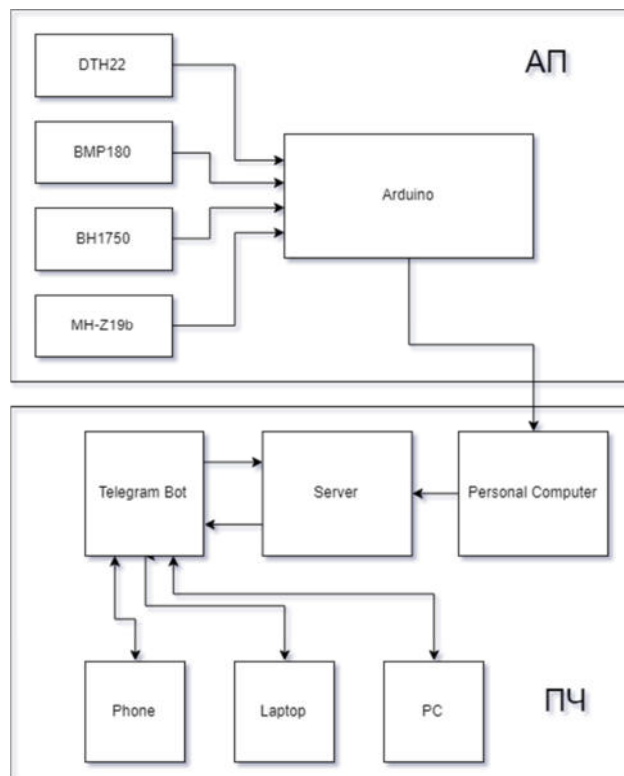


Рисунок 1 Схема інформаційної системи



Апаратна частина складається з наступних датчиків:

- температури повітря – вимірюється за допомогою модуля DHT22 (рисунок 2, а), який має збільшену точність, та мінімальну похибку
- вологості повітря – вимірюється одночасно із температурою модулем DHT22
- кількості вуглецевого газу – вимірюється модулем MH-Z19 (рисунок 2, г), який не є промисловим, проте точність не гірша від промислових варіантів. Перевагою цього модуля є низька ціна, малий час прогріву та режим обміну даних через універсальний асинхронний передатчик (UART)
- яскравості освітлення – аналізується модулем BH1750 (рисунок 2, б), який є доступним люксометром, котрий може працювати по шині I2C у зв'язці із Arduino
- атмосферного тиску – можна вимірювати цифровим барометром BMP180 (рисунок 2, в), який має малі розміри, є доступним, та працює по шині I2C

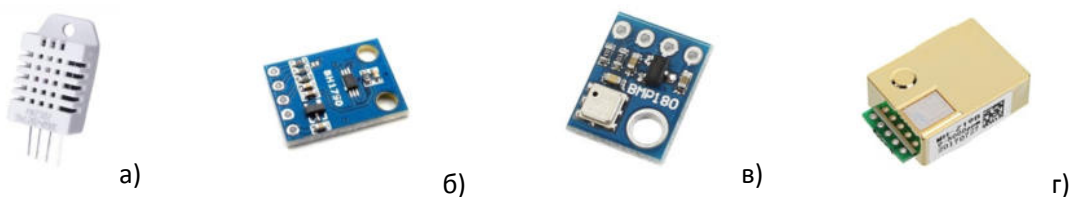


Рисунок 2 Сенсори: а) DHT22; б) BH1750; в) BMP180; г) MH-Z19B

Поеднання компонентів відбулось за схемою (рисунок 3).

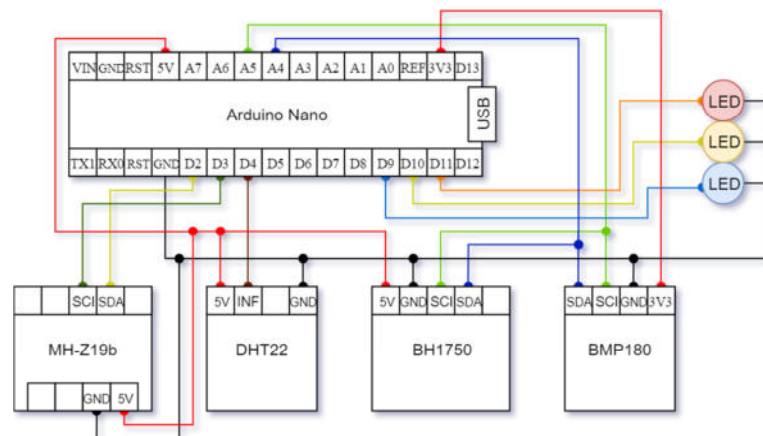


Рисунок 3 Схема підключення апаратної частини

Компоненти BH1750 та BMP180 під'єднані до одних пінів Ардуїно. Справа в тому, що ці модулі використовують шину I2C для спілкування з мікроконтролером. Це дозволяє під'єднати багато компонентів при невеликій кількості вхідних пінів Arduino nano.

I2C є послідовним протоколом для двопровідного інтерфейсу для підключення низькошвидкісних пристроїв, таких як мікроконтролери, EEPROMs, A/D і D/A перетворювачі, інтерфейси вводу/виводу та інші аналогічні периферійні пристрої в вбудованих системах. Він був винайдений компанією Philips і в даний час використовується практично всіма основними виробниками IC. Кожен підлеглий пристрій I2C потребує адреси - вони все одно повинні бути отримані від NXP (раніше напівпровідників Philips).

Шина I2C популярна, тому що вона проста у використанні, може бути більше одного майстра, визначається лише верхня швидкість шини і тільки два дрони з підтягувальними резисторами потрібні для підключення майже необмеженого числа пристроїв I2C. I2C може використовувати навіть більш повільні мікроконтролери з загальним призначенням вводу-виводу, оскільки їм потрібно лише генерувати правильні умови запуску і зупинки на додаток до функцій для читання і запису байта.

Початкові специфікації I2C визначали максимальну тактову частоту 100 кГц. Пізніше це було збільшено до 400 кГц як швидкий режим. Існує також високошвидкісний режим, який може досягати 3,4 МГц, а також 5-МГц ультрашвидкий режим.

Світлодіоди буди підключені до пінів D9 – D11. Ці піни були обрані тому що вони підтримують ШІМ. Це дозволило використовувати механізми для плавного включення/вимикання світлодіоду, що тепер не так сильно відволікає під час роботи пристрою.

Програмна частина складається зі скрипту опитування COM-порту, на якому знаходиться мікроконтролер Arduino, після цього – дані збираються протягом 5 хвилин та відправляються на сервер Things Speak, де вони і будуть зберігатись. Це виключає ситуації, коли прилад або затримався із отриманням даних від сенсору, а таке можливе із модулем DHT22, в якого час опитування 2 секунди, за його документацією. Також модуль MH-Z19 може повертати результат із затримкою до 8 секунд. Тому щоб уникнути ситуацій із даними за різний проміжок часу, в код програми опитування COM порту був доданий таймер, який збирає дані протягом 5 хвилин та потім висилає на сервер середнє арифметичне по кожному показнику. Таким чином на сервері ми отримуємо дані за 5 хвилин стабільно, без затримок. У випадку, якщо відправка даних на сервер не була успішною – програма робить одне додаткове коло із опитуванням мікроконтролера та висилає все на сервер. Так буде продовжуватись до тих пір, поки дані нарешті не будуть відправлені, тобто не буде отримано від сервера статус, що дані успішно отримані.

Сам сервіс Things Speak має сторінку користувача, на якій можливо створити свій «канал», на якому будуть зберігатись дані з приладу, а також є графік зміни значень кожного поля (рисунк 4).

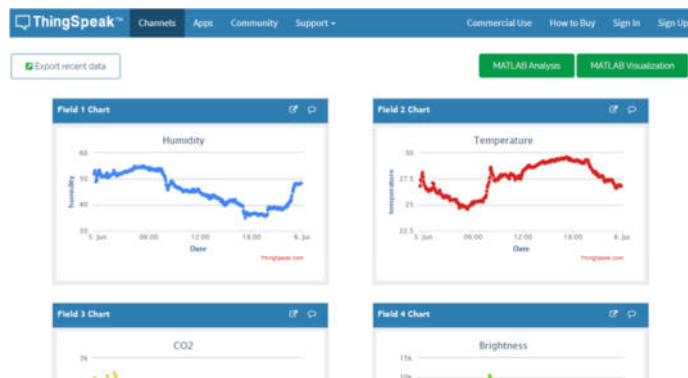


Рисунок 4 – Сторінка перегляду даних каналу

До цих даних має доступ Telegram бот, який аналізує отримані дані та повідомляє, у випадку виходу за межі дозволених норм. (рисунк 5)

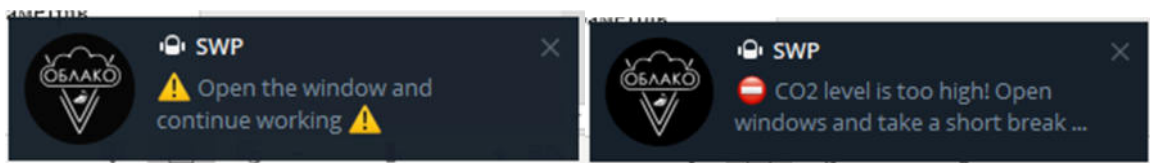


Рисунок 5 Повідомлення від боту: а) рівень вуглецевого газу приближається до критичного; б) критичний рівень вуглецевого газу

Також бот дозволяє користувачу «спілкуватися» з апаратною частиною та дізнаватися про дату останнього оновлення даних на сервері, температуру, вологість повітря, концентрацію CO<sub>2</sub>, освітленість, статус моніторингу рівня CO<sub>2</sub>, статус моніторингу чи працюють сенсори в даний момент, це дуже зручно, наприклад для контролю батьками віддалено мікроклімату робочого місця дитини.

#### Висновки та перспективи подальших досліджень

Результатом роботи інформаційної системи є збір даних з усіх сенсорів, колекціонування цих даних, та аналіз із подальшим повідомленням користувача про зміни параметрів мікроклімату. Система пройшла тестування як система розумного робочого місця, але може бути адаптована і під інші проекти.

Перспективами подальшого розвитку є створення окремого веб сервісу для колекціонування даних, замість користування Things Speak.

**Список використаної літератури**

1. Мікроклімат робочого місця ДСанПІН 3.3.2.007-98 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>.
2. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>.
3. Державні санітарні правила і норми влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу ДСанПіН 5.5.2.008-01. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0063588-01>

**References**

1. Mikroklimat robochoho mistsia DSanPIN 3.3.2.007-98 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu:
2. Sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychikh prymishchen DSN 3.3.6.042-99 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>.
3. Derzhavni sanitarni pravyla i normy vlashtuvannia, utrymannia zahalnoosvitnikh navchalnykh zakladiv ta orhanizatsii navchalno-vykhovnoho protsesu DSanPiN 5.5.2.008-01. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0063588-01>

UDC 510.2+007

P. P. TROKHIMCHUCK

Lesya Ukrayinka East European National University

## PROBLEMS OF CREATION UNIVERSAL AUTOMATA THEORY AND EFFECTIVE CALCULATIONS

*Problems of creation universal theory of computing automata are discussed. This problem is connected with problem of creation the theory of effective calculations. Short historical analysis of these problems is represented. In particular, Turing machines, von Neumann semi-reproducing and cellular automata are analyzed. For resolution of these problems polymetric concept was used. Realization of this concept in automata theory is theory of functional-logical automata. We show that functional-logical automata may be represented as functional expanded von Neumann self-reproducing automata or more deep formalized cellular automata. Basic notions of this theory and its applications are analyzed.*

*Key words: automata theory, calculation, functional-logical automata, open systems, polymetric analysis, functional numbers, hybrid theory of systems.*

П. П. ТРОХИМЧУК

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

## ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ АВТОМАТІВ ТА ЕФЕКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

*Обговорюються проблеми створення універсальної теорії обчислювальних автоматів. Ця проблема пов'язана з проблемою створення теорії ефективних обчислень. Представлено короткий історичний аналіз цих проблем. Зокрема, детально проаналізовано самовідновні та кліткові автомати фон Неймана, машини Тьюрінга. В зв'язку з тим, що гаслом сучасної інформатики є формалізація вислову Люра Холла «Все, що йде з голови – розумне», то для розв'язання цих проблем була застосована поліметрична концепція (теорія змінної міри або ж систем зі змінною ієрархією). Важливе значення для застосування цієї концепції мають наступні складові поліметричного методу; теорія функціональних чисел (узагальнення квадратичних форм або ж функціональне розширення чисел через квадратичні форми), узагальнені математичні перетворення (15 мінімальних типів, лише дев'ять з яких є математичними в загально прийнятому сенсі цього слова), інформаційні решітки, теорія інформаційних обчислень (що була побудована за аналогією з аналітичною механікою), гібридна теорія систем (теорія аналізу, синтезу та формалізації будь-яких знань чи виду діяльності). Є лише 10 мінімальних типів цих систем, чотири з яких не є математичними в загальноприйнятому сенсі цього слова. Також введений конструктивний параметр зв'язку між елементами конструктивну – параметр зв'язності. Реалізація цієї концепції в теорії автоматів є теорією функціонально-логічних автоматів. Показано, що функціонально-логічні автомати можна розглядати як функціонально розширені самовідновні автомати фон Неймана або ж більш глибоко формалізовані кліткові автомати. З точки зору поліметричного аналізу процедуру самовідновлення можна розглядати, як циклічну процедуру мвідновлення поліметричної міри. Проаналізовано основні концепції та поняття цієї теорії та її можливі застосування.*

*Ключові слова: теорія автоматів, обчислення, функціонально-логічні автомати, відкриті системи, поліметричний аналіз, функціональні числа, гібридна теорія систем.*

П.П. ТРОХИМЧУК

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ УНІВЕРСАЛЬНОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Обсуждаются проблемы создания универсальной теории вычислительных автоматов. Эта проблема связана с проблемой создания теории эффективных вычислений. Представлены краткий исторический анализ этих проблем. В частности, детально проанализированы самовосстанавливающиеся и клеточные автоматы фон Неймана, машины Тьюринга. Реализацией этой концепции в теории автоматов является теория функционально-логических автоматов. Показано, что функционально логические автоматы можно рассматривать как функционально расширенные*

самовосстанавливающиеся автоматы фон Неймана или более глубоко формализованные клеточные автоматы. Проанализированы основные понятия этой теории и ее возможные применения.

Ключевые слова: теория автоматов, вычисления, функционально-логические автоматы, открытые системы, полиметрический анализ, функциональные числа, гибридная теория систем.

### Introduction

Automata theories are one of the basic theories of modern computer science [1 – 7]. Therefore the system analyses of this problem has large value for the determination of the new perspective directions of development the computer science and other sciences, which may be influenced on the resolution of basic problems of the theory of computer science.

Automata theories are studied of abstract machines and automata, as well as the computational problems that can be solved using them. It is a theory in theoretical computer science and discrete mathematics (a subject of study in both mathematics and computer science). The word *automata* (the plural of *automaton*) comes from the Greek word αὐτόματα, which means "self-acting" [1].

Basic computers are a finite-state machine, which belongs to a well-known type of von Neumann automaton [1]. This automaton consists of states (represented in the figure by circles) and transitions (represented by arrows). As the automaton sees a symbol of input, it makes a transition (or jump) to another state, according to its transition function, which takes the current state and the recent symbol as its inputs.

Automata play a major role in theory of computation, compiler construction, artificial intelligence, parsing and formal verification [1 – 7].

An automaton is a construct made of *states* designed to determine if the input should be accepted or rejected [1 – 7]. It looks a lot like a basic board game where each space on the board represents a state. Each state has information about what to do when an input is received by the machine (again, rather like what to do when you land on the *Jail* spot in a popular board game). As the machine receives a new input, it looks at the state and picks a new spot based on the information on what to do when it receives that input at that state. When there are no more inputs, the automaton stops and the space it is on when it completes determines whether the automaton accepts or rejects that particular set of inputs.

An automaton *runs* when it is given some sequence of *inputs* in discrete (individual) *time steps* or steps. An automaton processes one input picked from a set of *symbols* or *letters*, which is called an *alphabet*. The symbols received by the automaton as input at any step are a finite sequence of symbols called *words*. An automaton has a finite set of *states*. At each moment during a run of the automaton, the automaton is *in* one of its states. When the automaton receives new input it moves to another state (or transitions) based on a function that takes the current state and symbol as parameters. This function is called the *transition function*. The automaton reads the symbols of the input word one after another and transitions from state to state according to the transition function until the word is read completely. Once the input word has been read, the automaton is said to have stopped. The state at which the automaton stops is called the final state. Depending on the final state, it's said that the automaton either *accepts* or *rejects* an input word. There is a subset of states of the automaton, which is defined as the set of *accepting states*. If the final state is an accepting state, then the automaton *accepts* the word. Otherwise, the word is *rejected*. The set of all the words accepted by an automaton is called the *language recognized by the automaton* [1 – 4].

In short, an automaton is a mathematical object that takes a word as input and decides whether to accept it or reject it. Since all computational problems are reducible into the accept/reject question on inputs, (all problem instances can be represented in a finite length of symbols, automata theory plays a crucial role in computational theory.

First theory of automata was Turing machine [2]. A Turing machine is a mathematical model of computation that defines an abstract machine, which manipulates symbols on a strip of tape according to a table of rules. Despite the model's simplicity, given any computer algorithm, a Turing machine capable of simulating that algorithm's logic can be constructed.

The Turing machine was invented in 1936 by Alan Turing [10], who called it an *a-machine* (automatic machine). With this model, Turing was able to answer two questions in the negative: (1) Does a machine exist that can determine whether any arbitrary machine on its tape is "circular" (e.g., freezes, or fails to continue its computational task); similarly, (2) does a machine exist that can determine whether any arbitrary machine on its tape ever prints a given symbol. Thus by providing a mathematical description of a very simple device capable of arbitrary computations, he was able to prove properties of computation in general—and in particular, the uncomputability of the Entscheidungsproblem ("decision problem") [2].

Thus, Turing machines prove fundamental limitations on the power of mechanical computation [1, 2]. While they can express arbitrary computations, their minimalistic design makes them unsuitable for computation in practice: real-world computers are based on different designs that, unlike Turing machines, use random-access memory.



The machine operates on an infinite memory tape divided into discrete *cells* [1]. The machine positions its *head* over a cell and "reads" (scans) the symbol there. Then, as per the symbol and its present place in a *finite table* of user-specified instructions, the machine (i) writes a symbol (e.g., a digit or a letter from a finite alphabet) in the cell (some models allowing symbol erasure or no writing), then (ii) either moves the tape one cell left or right (some models allow no motion, some models move the head), then (iii) (as determined by the observed symbol and the machine's place in the table) either proceeds to a subsequent instruction or halts the computation.

In general case as automaton may be represented next systems and theories: McCulloch-Pitts neural networks [5], Gödel's numbers [5], Kalman's polylinear machines [5], Fibonacci computers [5], systolic computers [5], neurocomputers [5], neural and cellular networks [5], a tensor analysis of the Cron contours and its diacoptic [5], quantum mechanical computers [5], fifth-generation computers [5], and most of all – self-reproducing von Neumann automata [3].

No computers, including Fibonacci, quantum-mechanical, and fifth-generation computers have gone up to Gödel's numbers [4]. For the first time, Gödel's numbers are very well used for theoretical analysis of computers and for the creation of new types of computers, pointing out von Neumann [1, 3], and in more detail it was painted by M. Minsky [4]. In general, Gödel's numbers are the following values:

$$N_G = A^\alpha B^\beta C^\gamma, \quad (1)$$

Where  $N_G, A, B, C, \alpha, \beta, \gamma$  - numbers. With this representation of numbers it is easy to move from a numerical representation to a linguistic one. Let's say  $A, B, C$  - a numerical representation,  $\alpha, \beta, \gamma$  - representation for letters, and (1) - linguistic. But here comes the question, which is one of the main issues of modern cybernetics: how to link the cybernetics itself (analysis) with the theory of discrete automata, including the Gödel numbers. Most successfully it is connected in living automata, which, for example, is a man.

### Basic results and discussions

Let us now turn to the theory of the functional-logical automata [5 – 7].

Firstly we must introduce basic concepts of Polymetric Analysis, which is necessary of the creation theory of functional-logical automata [5, 6].

**Definition 1. Mathematical construction** is called set all possible elements, operations and transformations for resolution corresponding problem. The basic functional elements of this construction are called constructive elements.

**Definition 2.** The mathematical constructive elements  $N_{x_{ij}}$  are called **the functional parameters**

$$N_{x_{ij}} = x_i \cdot \overline{x_j}, \quad (2)$$

where  $x_i, \overline{x_j}$  - the straight and opposite parameters, respectively;  $\cdot$  - respective mathematical operation.

**Definition 3.** The mathematical constructive elements  $N_{\varphi_{ij}}$  are called the **functional numbers**

$$N_{\varphi_{ij}} = \varphi_i \circ \overline{\varphi_j}. \quad (3)$$

Where  $\varphi_i(x_1, \dots, x_n, \overline{x_1}, \dots, \overline{x_m}, \dots, N_{x_{ij}}, \dots)$ ,  $\overline{\varphi_j}(x_1, \dots, x_n, \overline{x_1}, \dots, \overline{x_m}, \dots, N_{x_{ij}}, \dots)$  are the straight and opposite functions, respectively;  $\circ$  - respective mathematical operation.

**Remark 1.** Functions  $\varphi_i, \overline{\varphi_j}$  may be have different nature: mathematical, linguistic and other.

The theory of generalizing mathematical transformations is created for works on functional numbers [13, 35].

**Definition 4. Qualitative transformations** on functional numbers  $N_{\varphi_{ij}}$  (straight  $A_i$  and opposite  $\overline{A_j}$ ) are called the next transformations. The straight qualitative transformations are reduced the dimension  $N_{\varphi_{ij}}$  on  $i$  units for straight parameters, and the opposite qualitative transformations are reduced the dimension  $N_{\varphi_{ij}}$  on  $j$  units for opposite parameters.

**Definition 5. Quantitative (calculative) transformations** on functional numbers  $N_{\varphi_{ij}}$  (straight  $O_k$  and opposite  $\overline{O_p}$ ) are called the next transformations. The straight calculative transformations are reduced  $N_{\varphi_{ij}}$  or corresponding mathematical constructive element on  $k$  units its measure. The opposite quantitative transformations are increased  $N_{\varphi_{ij}}$  or corresponding mathematical constructive element on  $l$  units its measure, i.e.

$$O_k \overline{O_l} N_{\varphi_{ij}} = N_{\varphi_{ij}} - k \oplus l. \quad (4)$$

**Definition 6. Left and right transformations** are called transformations which act on left or right part of functional number respectively.

**Definition 7.** The maximal possible number corresponding transformations is called **the rang of these transformations**

$$\text{rang}(A_i \bar{A}_j N_{\varphi_j}) = \max(i, j); \quad (5)$$

$$\text{rang}(O_k \bar{O}_p N_{\varphi_p}) = \max(k, p). \quad (6)$$

**Remark 2.** The indexes  $i, j, k, p$  are called **the steps of the corresponding transformations**.

Only 15 minimal basic types of generalizing mathematical transformations are existed [6].

To further describe the theory of information calculations (computing), we need to introduce the notion of information lattice [5, 6].

**Definition 8.** A generalized knot or generalizing mathematical element is called a ratio

$$B = \frac{stqo}{nmab} B_{ijkp}^{a\beta\gamma\dots} = A_{i_1} \dots A_{i_a} \bar{A}_{j_1} \dots \bar{A}_{j_\beta} O_{k_1} \dots O_{k_\gamma} \bar{O}_{p_1} \dots N_{\varphi_j}. \quad (7)$$

**Definition 9.** The constructive mathematical structure, which is created on the relations of type (7) is called the information lattice.

The notions of rangs of proper transformations and hierarchy of knots are represented in [5, 6].

For calculations next concepts were introduced.

**Definition 10.** Normal arithmetic is arithmetic over real and complex numbers.

**Definition 11.** The set of mathematical operations and transformations carried out over functional numbers, we call supermodular (functional) arithmetic.

**Definition 12.** Under modular arithmetic mean arithmetic, in which particular operations are carried out by the module of a certain number.

Now we represented the general problem of calculation in modern science according to [5, 6]. This problem is one of central in modern computing science. Systematization and representation of large volume of the information is connected with various technical and mathematical difficulties. In some chapters of information calculation as selfnumeric algorithms the general approaches and criteria of estimations the effectivity are absented.

In this case we used the polymetric doctrine, more detailly - the measure of calculation (computation). In addition we introduce the concept of informative calculations.

Generalizing mathematical element may be represented universal measure of quantity of information [5, 6].

These elements are created informative lattice [5, 6]. For this case it was called as knots [5, 6]. Informative lattice is basic array of theory of informative calculations. This theory was constructed analogously to the analytical mechanics [5, 6].

Basic elements of this theory are:

**Definition 13.** Informative calculation (computability)  $C$  is number of possible mathematical operations, which are required for the resolution of proper problem.

**Definition 14.** Technical informative calculation (computability) is

$$C_t = C \sum_{i=1}^n t_i, \quad (8)$$

where  $t_i$  - realization time of proper computation.

**Definition 15.** Generalizing technical informative calculation (computability) is

$$C_{ig} = k_{ac} C_t, \quad (9)$$

where  $k_{ac}$  - a coefficient of algorithmic complexity [5, 6].

Basic principle of this theory is the **principle of optimal (minimal) informative calculations** [5, 6]: any algebraic, including constructive, informative problem has optimal resolution for minimum informative computability  $C$ , technical informative computability  $C_t$  or generalizing technical informative computability  $C_{ig}$ .

**Remark 3.** The principle of optimal informative calculations is more general as basic principles of information theory as principle of information coding, determination of optimal algorithms and other.

**Remark 4.** We have into account the constructive, but not functional, minimum.

**Remark 5.** The principle of optimal informative calculations is analogous to action and entropy (second law of thermodynamics) principles in physics and information theory (Shannon theorem) [5, 6].

Idea of this principle may be explained on the basis de Broglie formula [6]

$$S_a / \hbar = S_e / k_B = S_g \quad (10)$$

(equivalence of quantity of ordered and disorder information) [6]. Where  $S_a$  - action,  $\hbar$  - Planck constant,  $S_e$  - entropy and  $k_B$  - Boltzman constant and  $S_g$  may be represented as dimensionless measure of information.

Therefore we can go from dimensional quantities (action and entropy) to dimensionless quantity - number of proper mathematical operations.

For classification the computations (calculations) on informative lattices hybrid theory of systems (HTS) was created [5, 6]. This theory allow to analyze proper system with point of view of its complexity,

The basic principles of hybrid theory of systems are next: 1) **the criterion of reciprocity**; 2) **the criterion of simplicity**.

The criterion of reciprocity is the principle of the creation the corresponding mathematical constructive system (informative lattice). The criterion of simplicity is the principle the optimization of this creation.

The basic axiomatic of hybrid theory of systems is represented below.

*Definition 16.* The set of functional numbers and generalizing transformations together with principles reciprocity and simplicity (informative lattice) is called **the hybrid theory of systems** (in more narrow sense the criterion of the reciprocity and principle of optimal informative calculations).

**Criterion of the reciprocity** for corresponding systems is signed the conservation in these systems the next categories:

- 1) the completeness;
- 2) the equilibrium;
- 3) the equality of the number epistemological equivalent known and unknown knotions.

**Criterion of the simplicity** for corresponding systems is signed the conservation in these systems the next categories:

- 1) the completeness;
- 2) the equilibrium;
- 3) the principle of the optimal calculative transformations.

Criterion of reciprocity is the principle of creation of proper informative lattice. Basic elements of principle reciprocity are various nuances of completeness. Criterion of the simplicity is the principle of the optimality of this creation.

For more full formalization the all famous regions of knowledge and science the **parameter of connectedness**  $\sigma_i$  was introduced. This parameter is meant the number of different bounds the one element of mathematical construction with other elements of this construction. For example, in classic mathematics  $\sigma_i = 1$ , in linguistics and semiotics  $\sigma_i > 1$ . The parameter of connectedness is the basic element for synthesis in one system of formalization the all famous regions of knowledge and science. It is one of the basic elements for creation the theory of functional logical automata too.

Basic mathematical element of polymetric analysis is functional number (3) [5, 6]. As in Greece mathematics number is basic elements of its system. For these numbers generalizing mathematical transformations were constructed (See formula (7)). 15 minimal types of its transformations are existed. Informative lattice is constructed on the basis if functional numbers and generalizing mathematical transformations. Theory of informative calculations is created for this lattice. Basic principle of this theory is the principle of optimal calculations.

HTS theory is based on two criterions: criterion of reciprocity - principle of creation of proper formal system, and criterion of simplicity - principle of optimality of this creation. For "inner" bond of two elements of informative lattice a parameter of connectedness  $\sigma_i$  was introduced. Principle of optimal informative calculation is included in criterion of simplicity.

At help these criteria of reciprocity and simplicity and parameter of connectedness the basic famous parts of knowledge and science may be represent as next 10 types of hybrid systems [5, 6]:

1. The system with conservation all positions the criteria of reciprocity and simplicity for all elements of mathematical construction ( $N_{\varphi_{ij}}$  and transformations) is called the *simple system*.

2. The system with conservation the criterion of simplicity only for  $N_{\varphi_{ij}}$  is called the *parametric simple system*.

*Remark 6.* Further in this classification reminder of criteria of reciprocity and simplicity is absented. It mean that these criteria for next types of hybrid systems are true.

3. The system with conservation the criterion of simplicity only for general mathematical transformations is called *functional simple system*.

4. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation and with  $\sigma_i = 1$  is called the *semisimple system*.

5. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for  $N_{\varphi_{ij}}$  and with  $\sigma_i = 1$  is called the *parametric semisimple system*.

6. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for general mathematical transformations and with  $\sigma_i = 1$  is called the *functional semisimple system*.

7. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation and with  $\sigma_i \neq 1$  is called *complicated system*.

8. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for  $N_{\varphi_i}$  is called *parametric complicated system*.

9. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for general mathematical transformations and with  $\sigma_i \neq 1$  is called *functional complicated system*.

10. The system with nonconservation the criteria of reciprocity and simplicity and with  $\sigma_i \neq 1$  is called *absolute complicated system*.

With taking into account 15 basic types of generalized mathematical transformations we have 150 types of hybrid systems; practically 150 types of the formalization and modeling of knowledge and science.

Only first six types of hybrid systems may be considered as mathematical, last four types are not mathematically. Therefore HTS may be describing all possible system of knowledge. Problem of verbal and nonverbal systems of knowledge is controlled with help of types the mathematical transformations and parameter connectedness [5, 6].

Logic, which is constructed on elements (7), was called functional logic. Roughly speaking it is the functional expansion of fuzzy logic. It is caused the name of proper automaton.

*Definition 17.* The functional-logical (polymetric) automaton is called the information lattice, which is constructed using a hybrid system approach, which provides super-modular operations and which can perform certain operations without human intervention [5 – 7].

The alphabets, words and tapes of functional-logical (polymetric) automaton may be giving with the help of generalizing mathematical transformations and its proper combinations [5 – 7].

HTS allows classifying all possible knowledge by step simplicity – complexity. It may be used for the representation evolution of development of concrete science from complexity to simplicity.

Only first four types of hybrid systems may be considered as mathematical, last four types are not mathematically. Therefore HTS may be describing all possible system of knowledge. Problem of verbal and nonverbal systems of knowledge is controlled with help of types the mathematical transformations and parameter connectedness [5 – 7].

HTS may be used for the classification and creation old and new chapters of all science, including computing science.

HTS may be used for the represented of evolution of systems in two directions: 1) from simple system to complex system (example, from classic to quantum mechanics) and 2) conversely, from complex system to simple system (example, from formal logic to mathematical logic) [5 – 7].

Hybrid theory of systems is open theory. Parameters of openness are number of generalizing mathematical transformations and parameter of connectedness. Thereby we have finite number of types of systems, but number of systems may be infinite. Hybrid theory of systems allows considering verbal and nonverbal knowledge with one point of view [15 – 7].

HTS may be represented as application PA (HTS) to the problem of calculation [5 – 7]. This theory was used for the problem of matrix computation and problem of arrays sorting [5, 6].

PA may be represented as natural concept of foundation of mathematics. It may be represented as formalization Pythagorean phrase “Numbers rules of the World”, Plato concept of three types of numbers: arithmetical (pure mathematics); sensitive (applied mathematics) and ideal (numerology), and variant resolution S. Beer problem of complexity in more widely sense [5, 6].

In conclusion, we give a functional diagram of the possible implementation of a functional-logical computer (Fig. 1).

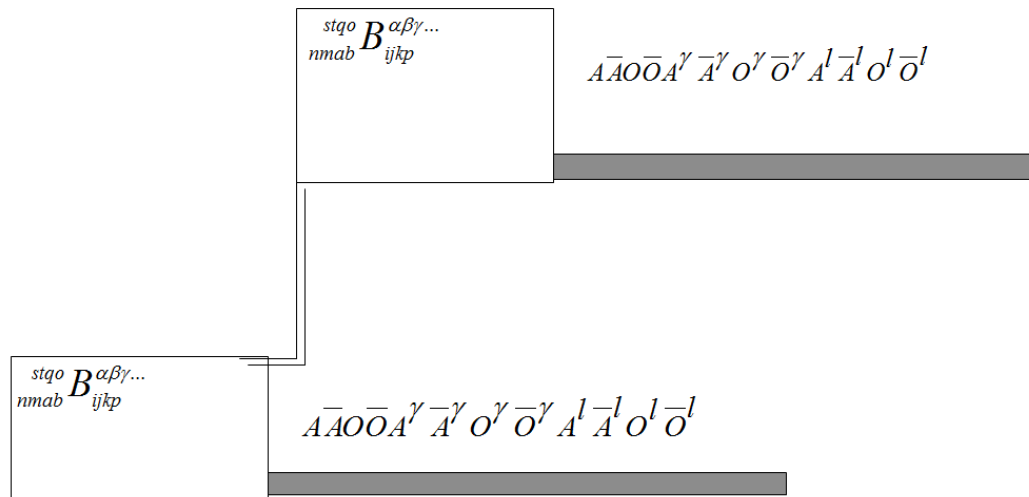


**Fig. 1.** Functional-logical scheme of self-reproducing [13].

If the transformations are such that the constructive sleeve reproduces  $^{stqo}_{nmab} B^{\alpha\beta\gamma\dots}_{ijkp}$ , then we have self-reproducing; if not - then or in part, or extended is also self-reproducing. The most interesting here is, of course, expanded self-reproducing. You can define adaptive transformations and a target function (transformation) that will be responsible for evolutionary self-reproducing.

In whole polymetric analysis is the theory of open systems with variable hierarchy [5, 6]. Parameters of this openness are number and types of proper generalizing mathematical transformations and parameter of connectedness. Hierarchy may be determined with help qualitative transformations, which may be have various nature and various dimensions.

Hybrid theory of systems as universal theory of formalization the knowledge allow select of system type for representation of proper area of knowledge and its evolution from more simple system to more complex system and inversely - from more complex system to more simple system.

Problem simplicity-complexity is central problem for each science [5, 6]. Roughly speaking it is the problem of optimal formalization of knowledge.

Therefore this problem is basic for the creation new science. It was used by Aristotle, Descartes, Newton and other researches [5, 6].

So problem of complexity is one of central problem in modern mathematics and cybernetics [5, 6]. This problem is one of basic in synthetically sciences. Roughly speaking it has two aspects: system (problem of century in cybernetics according S. Beer [6]) and computing science (problem of computational complexity [5, 6]. Last problem is included in basic problems of modern mathematics (Smale problems) [5, 6].

As variant of resolution system aspect of problem complexity in cybernetics may be problem simplicity - complexity, which is included in Polymetric Analysis (PA) (universal system of analysis, synthesis and formalization of knowledge) as principle simplicity.

Computational complexity theory [5, 6] is a branch of the theory of computation in theoretical computer science that focuses on classifying computational problems according to their inherent difficulty, and relating those classes to each other. A computational problem is understood to be a task that is in principle amenable to being solved by a computer, which is equivalent to stating that the problem may be solved by mechanical application of mathematical steps, such as an algorithm. Basic problem of computing complexity is connected with polynomial calculations.

Computational complexity is a concept in computer science and theory of algorithms, depending on the function of indicating the volume of work that is performed by some algorithm, the size of the input data [5, 6]. The section studies the computational complexity, called the theory of computational complexity. The volume of work is usually measured by abstract concepts of time and space, called computational resources. The time is determined by the number of elementary steps needed to solve the problem, while the space defined by memory capacity, or space on the storage medium.

A problem is regarded as inherently difficult if its solution requires significant resources, whatever the algorithm used. The theory formalizes this intuition, by introducing mathematical models of computation to study these problems and quantifying the amount of resources needed to solve them, such as time and storage. Other complexity measures are also used, such as the amount of communication (used in communication complexity), the number of gates in a circuit (used in circuit complexity) and the number of processors (used



in parallel computing). One of the roles of computational complexity theory is to determine the practical limits on what computers can and cannot do [5, 6].

Closely related fields in theoretical computer science are analysis of algorithms and computability theory. A key distinction between analysis of algorithms and computational complexity theory is that the former is devoted to analyzing the amount of resources needed by a particular algorithm to solve a problem, whereas the latter asks a more general question about all possible algorithms that could be used to solve the same problem. More precisely, it tries to classify problems that can or cannot be solved with appropriately restricted resources. In turn, imposing restrictions on the available resources is what distinguishes computational complexity from computability theory: the latter theory asks what kind of problems can, in principle, be solved algorithmically.

### Conclusions

1. Comparative analysis of basic theories of computing automata is represented.
2. Von Neumann idea of self-reproducing automata as one of perspective direction of theoretical research in computing science is analyzed.
3. Necessity of creation new more general system concept of automaton theory is formulated.
4. Basic concepts of polymetric analysis as foundation of theory of functional-logical automaton (functional numbers, information lattice, theory of informative calculation and hybrid theory of systems) are represented.
5. Comparative analysis of theory the functional-logical automata and other computing theories, including automata, is observed.
6. Perspectives of using the polymetric analysis and theory of functional-logical automata for resolution other problems of modern cybernetics and computing science are discussed.

### Література

1. Elements of Automata Theory. Ed. K. Shannon, J. MaCartey. – Princeton: University Press, 1956. 404 p.
2. Von Neumann J. The theory of self-reproducing automata. – Champaign: Illinois University Press, 1966. 388 p.
3. Turing A. M. Computing Machinery and Intelligence. // Mind, vol. 49. 1950. – P. 433-460.
4. Minsky M. Computation: Finite and Infinite Machines. – New York, London, Toronto: Prentice Hall, 1967. 375 p
5. Трохимчук П. П. Математичні основи знань. Поліметричний підхід. – Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 624с.
6. Trokhimchuck P. P. Polymetrical Analysis. History, Concepts, Applications. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2018. 280 p.
7. Trokhimchuck P. P. The theory of functional logical automata as new step in the development of optical calculations// Proc. SPIE, v.3238, 1997. P. 20-28.

### References

1. Elements of Automata Theory. Ed. K. Shannon, J. MaCartey. – Princeton: University Press, 1956. 404 p.
2. Von Neumann J. The theory of self-reproducing automata. – Champaign: Illinois University Press, 1966. 388 p.
3. Turing A. M. Computing Machinery and Intelligence. // Mind, vol. 49. 1950. P. 433-460.
4. Minsky M. Computation: Finite and Infinite Machines. – New York, London, Toronto: Prentice Hall, 1967. 375 p.
5. Trokhimchuck P. P. Mathematical foundations of knowledge. Polymetrical doctrine. – Lutsk: Vezha-Print, 2014. 624 p. (In Ukrainian)
6. Trokhimchuck P. P. Polymetrical Analysis. History, Concepts, Applications. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2018. 280 p.
7. Trokhimchuck P. P. The theory of functional logical automata as new step in the development of optical calculations// Proc. SPIE, v.3238, 1997. P. 20-28.

УДК 510.6

V.YE. KHODAKOV, A.YE. SOKOLOV, G.V. VESELOVSKAYA  
Kherson National Technical University**MODELING IMPROVEMENT IN MOTIVATIONAL  
COMPONENTS OF INFORMATION TECHNOLOGIES  
FOR COMPUTERIZED TRAINING SYSTEMS**

*Motivation is considered in the context of awareness of the need, and incentive to carry out active, interested, purposeful, highly productive information assimilation activities in the subject area of computerized information systems, technologies and learning processes. It was noted that the general elaboration in the questions of motivation is not enough for the effective formation, and use of motivational attitudes in this subject area; further work with a number of aspects of motivation is relevant. The aim of the study was to identify the features of motivation modeling, contributing to the increase in the effectiveness of information processes for computerized learning. Information interaction and mutual influence of the student with the objects of the training system, and the environment is considered as a complex multi-purpose process with disturbing influences and coordination. Modeling the motivation of the student's informational behavior requires the use of vector objective functions, and taking into account the features in the structural model for the formation of information flows associated with the motivation of learning processes. In the context of the motivational processes of the information subsystem for learning, information flows in expectations and decisions of the learner, their comparison, and consideration in the reactions of the external environment, with a reverse effect on the learner's goals to improve the optimal decision making are highlighted. The expediency of optimization modeling for motivation in information processes of computerized education within the framework of organizational control technologies for information systems, using vector (multi-criteria) optimization, the concepts in optimality of Lagrange solutions, the Pareto principle, as well as the relevant assumptions, and conditions is substantiated. As a result, an integrated technology of optimization modeling for motivation in computerized information, and control learning subsystems, with the rationale for the concepts of effective implementation of modeling, is proposed.*

*Keywords: information technology, computerized system, training, motivation, model.*

В.Є. ХОДАКОВ, А.Є. СОКОЛОВ, Г.В. ВЕСЕЛОВСЬКА  
Херсонський національний технічний університет**ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОТИВАЦІЙНИХ  
СКЛАДОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НАВЧАННЯ**

*Мотивацію розглянуто в контексті усвідомлення необхідності та стимулу можливості здійснювати активну, зацікавлену, цілеспрямовану, високопродуктивну діяльність інформаційного засвоєння в предметній галузі комп'ютеризованих інформаційних систем, технологій і процесів навчання. Відзначено, що загальної опрацьованості питань мотивації недостатньо для ефективного формування та використання мотиваційних установок у зазначеній предметній галузі, актуальною є подальша робота з низкою аспектів мотивації. Метою дослідження стало виявлення особливостей моделювання мотивації, що сприяють підвищенню ефективності інформаційних процесів комп'ютеризованого навчання. Інформаційна взаємодія і взаємовплив того, якого навчають, із об'єктами системи навчання та навколишнім середовищем розглянуто як складний багатоцільовий процес зі збуджуючими впливами й узгодженням. Моделювання мотивації інформаційної поведінки того, якого навчають, вимагає застосування векторних цільових функцій і врахування особливостей структурної моделі формування інформаційних потоків, пов'язаних із мотивацією процесів навчання. В контексті мотиваційних процесів інформаційної підсистеми навчання, виділені інформаційні потоки очікувань і рішень того, якого навчають, їх порівняння й урахування реакцій зовнішнього середовища, зі зворотним впливом на цілі того, якого навчають, для підвищення оптимальності прийняття рішень. Обґрунтовано доцільність оптимізаційного моделювання мотивації в інформаційних процесах комп'ютеризованого навчання в рамках технологій організаційного управління інформаційними системами, з застосуванням векторної (багатокритеріальної) оптимізації, концепцій оптимальності рішень за Лагранжем, принципу Парето, а також відповідних припущень і умов. В результаті, запропоновано інтегровану технологію оптимізаційного моделювання мотивації в комп'ютеризованих інформаційно-керуючих підсистемах навчання, з обґрунтуванням концепцій ефективної реалізації моделювання.*

*Ключові слова: інформаційна технологія, комп'ютеризована система, навчання, мотивація, модель.*

В.Е. ХОДАКОВ, А.Е. СОКОЛОВ, Г.В. ВЕСЕЛОВСКАЯ  
Херсонский национальный технический университет

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОТИВАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОБУЧЕНИЯ

*Мотивация рассмотрена в контексте осознания необходимости и стимула возможности осуществлять активную, заинтересованную, целеустремленную, высокопродуктивную деятельность информационного усвоения в предметной области компьютеризированных информационных систем, технологий и процессов обучения. Отмечено, что общей проработанности вопросов мотивации недостаточно для эффективного формирования и использования мотивационных установок в указанной предметной области, актуальной является дальнейшая работа с рядом аспектов мотивации. Целью исследования стало выявление особенностей моделирования мотивации, способствующих повышению эффективности информационных процессов компьютеризированного обучения. Информационное взаимодействие и взаимовлияние обучаемого с объектами системы обучения и окружающей средой рассмотрено как сложный многоцелевой процесс с возмущающими воздействиями и согласованием. Моделирование мотивации информационного поведения обучаемого требует применения векторных целевых функций и учета особенностей структурной модели формирования информационных потоков, связанных с мотивацией процессов обучения. В контексте мотивационных процессов информационной подсистемы обучения, выделены информационные потоки ожиданий и решений обучаемого, их сравнение и учет реакций внешней среды, с обратным воздействием на цели обучаемого для повышения оптимальности принятия решений. Обоснована целесообразность оптимизационного моделирования мотивации в информационных процессах компьютеризированного обучения в рамках технологий организационного управления информационными системами, с применением векторной (многокритериальной) оптимизации, концепций оптимальности решений по Лагранжу, принципа Парето, а также соответствующих допущений и условий. В результате, предложена интегрированная технология оптимизационного моделирования мотивации в компьютеризированных информационно-управляющих подсистемах обучения, с обоснованием концепций эффективной реализации моделирования.*

*Ключевые слова: информационная технология, компьютеризированная система, обучение, мотивация, модель.*

#### **Problem's statement**

Strengthening motivation is a powerful catalyst for improving the quality of information perception, and expanding the volume of information consumption of students.

As a result, there is a huge positive impact on increasing the activity, efficiency and effectiveness of information learning processes.

Therefore, the knowledge, skills, and competencies of the students are improved.

Questions of motivation in human activity (both in general, and, in particular, for a sufficiently wide range on fields of activity) have received sufficiently fundamental, extensive and deep research by domestic and foreign scientists.

However, a number of questions of motivation related to the subject area of computerized information systems, technologies and learning processes, at the moment remains open, requiring the development or further improvement.

#### **Analysis of recent research and publications**

The concept of motivation as a whole, as well as regarding the learning processes, and their informational components, is largely due to the following personality characteristics that are formed or are formed in the process of activity [1-7]:

- the presence and awareness of goals, aspirations, interests, desires, motives, and related activities;
- understanding of the need, and importance for the development of new, improvement, self-development, and implementation of appropriate actions for this.

Also, the formation of motivation is strongly influenced by the environment (socio-economic factors, educational systems, cultural and family traditions, the level of development in science, and progress, the development of printed publication bases, and information resources, etc.) [1-7].

The presence of a person motivated goals, and objectives determines its attitude to many aspects of the surrounding reality, and certain behavior in it (production activities, training, etc.) [1-7].

First of all, this provides a significant increase in the degree of personal attention to certain information.

Accordingly, the ability to successfully implement a given information perception is enhanced.

At the moment, formed the fundamental theory, and practice in the field of technology [1-7]:

- formation of motivation;
- further control on the positive dynamics of motivation with the help of incentives, and predetermination in the results of its impact;
- coordination of personal, and socially significant motivational attitudes relating to the processes of labor activity.

Their main results are clearly applicable to educational work, one of the varieties of which is the consumption (perception, and assimilation) of information [1-7].

A particularly important role is played by the achievement of an appropriate level in consistency for the motivational goals of an individual, and a collective (enterprises, organizations, institutions, interests circle, etc.), in the midst of which the individual carries out certain activities, including informational training activities.

This consistency is necessary so that the results on the formation, and achievement for the motivational goals in the work activity of the individual, and the collective mutually reflect and predetermine each other.

In the most generalized form of presentation, for the purpose of greater clarity, the expected results of human activity when performing a certain type of work  $f_i$  should be considered as the simplest linear functional dependencies  $f_i(m)$  on the achieved levels of motivation  $m$ , which have the following form:  $f_i(m) = k * m$  [3, 4].

Here the coefficient  $k$  represents the ability to carry out these jobs, for which the prerequisites are the available skills, abilities, qualifications, etc. [3, 4].

Accordingly, with the formation of increasing motivation, with the desire to achieve the maximum possible value, it will grow and strive for the maximum both performance for activity, and incentives for professional growth.

#### Purpose of the study

The main focus of this work is to identify those features of motivation modeling in the structure of modern information learning processes that can have a positive impact on improving the efficiency of these processes.

At the same time, it is necessary to take into account that the interaction of the student with the trainer, information system of training and the environment, actively responding to the processes, and results of activities (or inaction) of the student, is quite a complex process, with a number of goals, disturbing influences and the need to harmonize the goals of the student and trainer.

Therefore, the display of the motivation for the student's informational behavior in the form of models requires the use of vector objective functions in the following general form:  $C = C(c_1, c_2, \dots, c_N)$  [1-7, 12].

It is important to take into account the features of the structural model for the formation of information flows associated with the motivation of learning processes.

In the context of the general information subsystem of learning, and the motivational processes occurring in it, the following information flows should first be highlighted:

- expectations and optimal decisions of the student;
- comparison of the student's expectations, and reactions of the environment, with the implementation of the reverse effects on the student's goals to enhance the optimization of his decision making.

Thus, we come to the need to consider vector (multi-criteria) optimization within the framework of technologies for organizational control of information systems.

#### Presentation of the main research material

The basis for the optimal control of the information subsystem on learning, and the motivational processes in it, when considered in the context of control organizational systems, is vector (multi-purpose, multi-criteria) optimization.

This optimization should take into account convex private functions of the goal, characteristic of organizational systems, as components of the goal vector, which can be considered as criteria (associating them with the semantics of criteria in the methodology of modeling, automatic control, decision-making) [8-19].

With simultaneous optimization of the components in the vector of the objective function (joint optimization of a number of particular objective functions), we have a rather simple to solve multi-parameter optimization of the following form [8-19]:

- in the minimized presentation format –  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{f}(\mathbf{x})$ ;
- in the expanded representation format –  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min f_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, n$ .

In this case, it is necessary to find the vector  $\mathbf{x}^*$  of dimension  $n$ , which simultaneously minimizes all the components for the target vector  $\mathbf{f}$  of dimension  $m$ .

When a stationary condition is specified by a matrix equation of the form  $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} = \mathbf{0}$  [13-15], a rectangular gradient matrix of the form  $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} = [\partial f_i / \partial x_j]$  is formed,  $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ .

Finding a solution to the earlier system of equations leads to obtaining the optimum point not for the entire vector function of the target, but only for a number of particular optima.

By virtue of the above, it is necessary to additionally obtain  $m$  connections between the components of the vector of the objective function.

The methodology for solving vector optimization problems works with a number of different ways for organizing additional links [8-15].

Among these methods, we note further the most applicable.

According to the method of the main criterion, where the importance of the criteria (goals) is ranked, and a fairly simple solution is used (its only, and greatest difficulty is the need to independently choose the main criterion), we have the following model of the form  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min f_k(\mathbf{x}) = \alpha_k$ .

According to the method of forming a single objective function, models of the polynomial type are applied:  $f(\mathbf{x}) = \sum_i \alpha_i f_i(\mathbf{x})$ .

The weighting coefficients  $\alpha_i = \partial f / \partial f_i$ , where  $\alpha_i > 0$ ,  $\sum_i \alpha_i = 1$ ,  $i = 1, \dots, k$ , reflect the sensitivity of the overall objective function to changes in the partial objective functions.

The weights are the normalized Lagrange multipliers in the model  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min f_i(\mathbf{x}), f_i(\mathbf{x}) - c_i = 0, i = 1, \dots, k$  with the Lagrange function  $L(\mathbf{x}, \lambda) = \lambda_0 f(\mathbf{x}) - \sum_i \lambda_i (f_i(\mathbf{x}) - c_i), i = 1, \dots, k$ .

We have the Lagrange problem while minimizing the effect of constraints [8-12].

You can assign weights based on the conditions of the problem, using models of the polynomial type  $f(\mathbf{x}) = \prod_i f_i^{\beta(i)}(\mathbf{x}), \beta(i) = \alpha_i, f_i > 0, i = 1, \dots, k$ .

In the case when there are structural, and feedbacks links, it is advisable to apply models of signomial optimization based on geometric programming, of a polynomial type:  $f(\mathbf{x}) = \sum_j C_j \prod_i f_i^{\beta(i,j)}(\mathbf{x}), \beta(i,j) = \alpha_{ij}, f_i > 0, C_j \geq 0, i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, p$ .

According to the minimax methods, benchmarks are formed:  $f_i(\mathbf{x}) \leq t_i, g_p(\mathbf{x}) = 0, g_q(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, k, p = 1, \dots, m, q = m + 1, \dots, l$ .

On the set of admissible values of  $\mathbf{x}$ , the indicated unambiguously leads to:

– inequality  $(t_i - f_i(\mathbf{x})) \geq 0$ ;

– the possibility, in the process of finding a strong optimum, to replace work with the  $C_0$  metric on work with a minimax deviation value  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \max (t_i - f_i(\mathbf{x})), i = 1, \dots, k$ .

According to the Pareto priority method, the key is to apply the definition of an extremum or a necessary condition.

We introduce into the formulation of the problem  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min f_i(\mathbf{x}), g_p(\mathbf{x}) = 0, g_q(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, k, p = 1, \dots, m, q = m + 1, \dots, l$  the following restrictions:

–  $f_i(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}_d)$  with  $i = 1, \dots, s$ ;

–  $f_i(\mathbf{x}) < f(\mathbf{x}_d)$  with  $i = s + 1, \dots, k$ .

Then you can go to the modified formulation of the problem  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min f_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, k, g_i \leq 0, i = 1, \dots, l, f_i(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}_d) \leq 0, i = 1, \dots, k$ .

Next, we can proceed to the formulation of the Lagrange problem with the Lagrange function  $L(\mathbf{x}, \lambda) = \lambda_0 f(\mathbf{x}) - \lambda g - \Lambda(f(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}_d))$  [8-12].

Moreover, the sensitivity coefficients of the objective function to the constraints  $\Lambda$  form a square matrix of Lagrange multipliers of the form  $\Lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_k] = [\partial f / \partial f_1, \dots, \partial f / \partial f_k], \lambda_{ii} = 1, i = 1, \dots, k$ .

Under the condition  $\lambda_{ij} = 0, i, j = 1, \dots, k$ , we have an optimum inside the region of admissible points in which the conditions of preference are observed – a strict inequality.

When enumerating admissible points, we have a local optimum in the form of an effective (Pareto-optimal) solution.

In the case when not all restrictions can be made strict, we have a weakly effective solution.

The application of the Pareto method consists in a sequence of actions for choosing a solution, characterized by minimal mutual influence of particular goals, and an analysis of the matrix  $\Lambda$  discussed above.

Thus, the solution of vector optimization problems can be brought to the solution of Lagrange problems, creating the possibility for a rigorous justification of the optimality criterion.

To determine the procedure for solving the vector optimization problem, which is Lagrange optimal, we will rely on the analysis, and refinement of the optimality criterion in the convex problem.

As a result, we will consider the simplified problem [8] with dimension  $n$  of vector  $\mathbf{x}$  and dimension  $m$  of vector  $\mathbf{f}$ :  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{f}(\mathbf{x})$ .

Specifying the stationarity condition as a necessary condition for the minimum of the function, we obtain the matrix equation of dimension  $m \times n$ :  $\Delta \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [\Delta f_1(\mathbf{x}), \dots, \Delta f_m(\mathbf{x})] = [[\partial f_1 / \partial x_1, \dots, \partial f_1 / \partial x_n], \dots, [\partial f_m / \partial x_1, \dots, \partial f_m / \partial x_n]] = [[0, \dots, 0], \dots, [0, \dots, 0]] \leftrightarrow \partial f_{ij} / \partial x_j = 0, i, j = 1, \dots, n$ .

To additionally obtain  $m$  links required when finding the minimum of a vector objective function, we apply the standard approach, which consists in the variation of constraints.

However, the vector of constraints takes the target vector  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \mathbf{a} = 0$ .



At the same time, the vector  $\alpha$  is determined by the value of the target vector at the minimum point  $(\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = \alpha)$ .

Thus, we have a vector problem with equality constraint in the form of a system of the following two mathematical expressions:  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{f}(\mathbf{x}); \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \alpha = 0$ .

The corresponding Lagrange function takes the following form:  $\mathbf{L}(\mathbf{x}, \lambda) = \lambda_0 \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \lambda(\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \alpha)$ .

In turn, the necessary minimum conditions form a system of equations [8-15]  $\Delta_{\mathbf{x}} \mathbf{L} = 0$ ,  $\Delta_{\lambda} \mathbf{L} = 0$ , which is in one-to-one correspondence with the system of equations  $\Delta_{\mathbf{x}} \mathbf{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha = 0$ .

This system of equations has no solution due to the inconsistency for the number of variables and relations.

Therefore, we introduce an additional connection for the indicated system of equations, predetermining the convexity of the particular objective functions [8-15].

The duality property allows you to come to a system containing the following components:

– provided that  $\lambda = \lambda^*$ ,  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{L}(\mathbf{x}, \lambda)$ ;

– under the condition  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ ,  $\lambda^* \rightarrow \max \mathbf{L}(\mathbf{x}, \lambda)$ .

Further we will proceed from the stationary nature of the problem, and apply the condition  $\lambda = \lambda^*$  of the previous system.

As a result, we will have the following:  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \{\lambda_0 \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \lambda(\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \alpha)\} = \text{constant}$  under the condition  $\lambda = \lambda^*$ .

Let us rely on the fact that at the minimum point the target vector  $\mathbf{f}$  is equal to the vector of optimal values.

Then the previous mathematical expression can be modified as follows:  $\lambda_0 \mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \lambda^*(\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha^*) = \lambda_0 \alpha^*$ .

In this case, the restrictions become conditions  $(\lambda_0 - \lambda^*)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \alpha) = 0$  of complementary non-rigidity [8-15].

The appearance of the condition in the above form for the Lagrange function is justified by the minimal influence of the objective functions.

The same are the requirements when working with Pareto optimality.

The Lagrange function, accompanied by constraints-conditions of complementary non-rigidity, takes the following form:  $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \{\lambda_0 \mathbf{f}(\mathbf{x}) - (\lambda - \lambda_0)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \alpha)\} = 0$  provided that  $\lambda = \lambda^*$ .

Based on the above concepts, the necessary Lagrange optimality condition for the stationary convex vector optimization problem takes the form of a system containing the following three mathematical equations:  $\Delta \mathbf{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha^* = 0$ ,  $\lambda_0 \mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - (\lambda^* - \lambda_0)(\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha^*) = 0$ .

Additionally, we consider the matrix of reduced vectors for Lagrange multipliers in the form  $\lambda^{**} = [\lambda_{ij}]$ ,  $i, j = 1, \dots, m$ ,  $\lambda_{ii} = 1$ .

Then the optimality condition takes the form of the following system of equations:  $\Delta \mathbf{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha^* = 0$ ,  $\lambda^{**} (\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \alpha^*) = 0$ .

An additional condition is categorized as complementary non-rigidity conditions.

Consider the column vector of the objective function  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ , consisting of the  $x^2$  and  $(x-1)^2$ .

Applying the above condition, we will have a vector equation in which:

– the left side of the equation is a column vector  $\Delta \mathbf{f}(\mathbf{x})$  with elements  $d(x^2) / dx$ ,  $d((x-1)^2) / dx$ ;

– the right side of the equation is a column vector with two zero elements.

As a result, we obtain points of particular minima  $x_1^* = 0$ ,  $x_2^* = 1$ .

Applying the constraints  $f_1(x) - \alpha_1 = 0$ ,  $f_2(x) - \alpha_2 = 0$ , we will solve the problem with the vector objective function.

For this problem, we will have the following Lagrange functions:  $L_1(x, \lambda_{12}) = x^2 - \lambda_{12} ((x-1)^2 - \alpha_2)$ ;  $L_2(x, \lambda_{21}) = (x-1)^2 - \lambda_{21} (x^2 - \alpha_1)$ .

We also give the mathematical equations of the system that reflects the necessary optimum conditions:  $\partial L_1 / \partial x = 2x - \lambda_{12} 2(x-1) = 0$ ;  $\partial L_2 / \partial x = 2(x-1) - \lambda_{21} 2x = 0$ ;  $x^2 - \alpha_1 = 0$ ;  $(x-1)^2 - \alpha_2 = 0$ ;  $x^2 - \lambda_{12} ((x-1)^2 - \alpha_2) = 0$ ;  $(x-1)^2 - \lambda_{21} (x^2 - \alpha_1) = 0$ .

From the above relation it follows that:  $2x - \lambda_{12} 2(x-1) = 0$ ;  $2(x-1) - \lambda_{21} 2x = 0$ .

As a result, we have:  $\lambda_{12} = 1 / \lambda_{21}$ .

Let us apply the uniqueness of the optimum point and the limits.

We will have the following relation:  $\alpha_1 - \alpha_2 = 2x - 1$ .

You can also write the following:  $x^2 - (x / (x-1)) ((x-1)^2 - \alpha) = 0$ ;  $(x-1)^2 - ((x-1) / x) (x^2 - 2x + 1 - \alpha) = 0$ .

As a result, we get the following relationship:  $(x-1)^2 = x^2$ .

As a solution of the vector optimization problem, we obtain:

– the optimal value of  $\mathbf{x}^*$  is reached at point 0.5;

– the value of the objective function  $\alpha^*$  for optimum is 0.25.

The advanced assumption about the convexity of the particular objective functions made it possible to obtain the optimal solution without using the methods of compromises and expert assessments.

### Findings

In this paper, we investigated the problems of modeling motivation in the computerized learning process, which was considered as an active information process.

A technology has been developed for solving problems on optimization modeling of motivation in computerized informational learning subsystems, which are considered from the point of view of information-controlling type systems.

In particular, the following was substantiated:

- it is advisable that the methods of solving the problems of vector optimization in modeling the motivation in the computerized information subsystems of learning are based on the necessary conditions of the Lagrange problem;

- the solution of these problems in vector optimization, which are considered in terms of the use of convex particular objective functions, should be based on the property of duality, Lagrange optimality;

- the basis for compliance with the optimality condition in the set class of problems is the condition of complementary non-rigidity, which should be understood as achieving maximum independence for the components of the target vector at the optimum point (or as an appropriate analytical representation of the Pareto principle with convex components of the target vector);

- the required level for motivation of students should be associated with the convexity of the components in the vector of the objective function.

The results of the work carried out were tested on the basis of the Department of Information Technology of Kherson National Technical University.

As a result, the positive dynamics of the motivation, and effectiveness of computerized information learning processes when applying the concepts, and models proposed in this work was confirmed.

### References

1. Фаулер, С. Націлені на результат: що насправді мотивує людей / пер. Ю. Кузьменко. Київ: Наш Формат, 2018. 168 с.
2. Мачтакова, О. Г. Мотивація: від античності до постмодернізму: монографія. Одеса: Атлант, 2013. 210 с.
3. Hellriegel, D., Slocum, J., Woodman, R. Organizational Behavior: Instructor's Resource Guide to Accompany. Seventh edition. New York: West Publishing Company, 2003. 559 p.
4. Шаронова, Н. В. Организационное поведение: учеб. пособие. Харьков: ХПИ НУА, 2001. 187 с.
5. Богиня, Д. П., Семикіна, М. В. Трудовий менталітет у системі мотивації праці. Кіровоград: Поліграф-Терція, 2010. 428 с.
6. Коритко, С., Миронов, Ю. Формування системи мотивації праці на підприємстві. *Студентський науковий вісник «Керівник.ІНФО»* [Електронний ресурс]. 2012. URL: <http://kerivnyk.info/2012/05/korytko.html> (дата звернення 19.11.18).
7. Петров, Э. Г., Радванская, Л. Н., Шаронова Н. В. Современные технологии обучения в высшей школе. Харьков: Коллегиум, 2007. 172 с.
8. Yang, X. Optimization techniques and applications with examples. USA, UK: WILEY, 2018. 384 p.
9. Есипов, Б. А. Методы оптимизации и исследования операций. Конспект лекций: учеб. пособ. Самара: Издательство Самарского аэрокосмического университета, 2007. 180 с.
10. Черноруцкий, И. Г. Методы оптимизации в теории управления: учеб. пособ. Санкт-Петербург: Питер, 2004. 256 с.
11. Лутманов, С. В. Курс лекций по методам оптимизации. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 368 с.
12. Ziegelmann, J. P., Lippke, S. Use of Selection, Optimization, and Compensation strategies in health self-regulation: Interplay with resources and successful development. *Journal of Aging and Health*. 2007. № 19. P. 500-518.
13. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – Москва: Физматлит, 2005. 176 с.
14. Подиновский, В. В., Ногин, В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
15. Карпенко, А. П., Семенихин, А. С., Митина, Е. В. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации: обзор. Москва: Электронное издательство «Наука и образование»; издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Эл. № ФС 77. 2012. № 48211.
16. Красовский, А. А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1987. 712 с.
17. Operations research applications / Eds.: G. Stecca. Rome, Italy: AIRO (Associazione Italiana di Ricerca Operativa), 2017. 123 p.
18. Колмогоров, А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. Москва: Наука, 1987. 304 с.

19. Solomon J. Numerical algorithms: methods for computer vision, machine learning, and graphics: textbook. USA: CRC Press (AK Peters, Ltd.), 2015. 400 p.

#### Transliterated references

1. Fauler, S. Natsileni na rezultat: shcho naspravdi motyvuie liudei / per. Yu. Kuzmenko. Kyiv: Nash Format, 2018. 168 s.
2. Machtakova, O. H. Motyvatsiia: vid antychnosti do postmodernizmu: monohrafiia. Odesa: Atlant, 2013. 210 s.
3. Hellriegel, D., Slocum, J., Woodman, R. Organizational Behavior: Instructor's Resource Guide to Accompany. Seventh edition. New York: West Publishing Company, 2003. 559 p.
4. Sharonova, N. V. Organizatsionnoe povedenie: ucheb. posobie. Harkov: HPI NUA, 2001. 187 s.
5. Bohynia, D. P., Semykina, M. B. Trudovyi mentalitet u systemi motyvatsii pratsi. Kirovohrad: Polihraf-Tertsiiia, 2010. 428 s.
6. Korytko, S., Myronov, Yu. Formuvannia systemy motyvatsii pratsi na pidpriemstvi. Studentskyi naukovyi visnyk «Kerivnyk.INFO» [Elektronnyi resurs]. 2012. URL: <http://kerivnyk.info/2012/05/korytko.html> (data zvernennia 19.11.18).
7. Petrov, E. G., Radvanskaya, L. N., Sharonova N. V. Sovremennyye tehnologii obucheniya v vysshey shkole. Harkov: Kollegium, 2007. 172 s.
8. Yang, X. Optimization techniques and applications with examples. USA, UK: WILEY, 2018. 384 p.
9. Esipov, B. A. Metodyi optimizatsii i issledovaniya operatsiy. Konspekt lektsiy: ucheb. posob. Samara: Izdatelstvo Samarskogo aerokosmicheskogo universiteta, 2007. 180 s.
10. Chernorutskiy, I. G. Metodyi optimizatsii v teorii upravleniya: ucheb. posob. Sankt-Peterburg: Piter, 2004. 256 s.
11. Lutmanov, S. V. Kurs lektsiy po metodam optimizatsii. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2001. 368 s.
12. Ziegelmann, J. P., Lippke, S. Use of Selection, Optimization, and Compensation strategies in health self-regulation: Interplay with resources and successful development. *Journal of Aging and Health*. 2007. № 19. P. 500-518.
13. Nogin, V. D. Prinyatie resheniy v mnogokriterialnoy srede: kolichestvennyi podhod. – Moskva: Fizmatlit, 2005. 176 s.
14. Podinovskiy, V. V., Nogin, V. D. Pareto-optimalnyie resheniya mnogokriterialnyih zadach. M.: Fizmatlit, 2007. 256 s.
15. Karpenko, A. P., Semenihin, A. S., Mitina, E. V. Populyatsionnyie metodyi approksimatsii mnozhestva Pareto v zadache mnogokriterialnoy optimizatsii: obzor. Moskva: Elektronnoe izdatelstvo «Nauka i obrazovanie»; izdatel FGBOU VPO «MGTU im. N.E. Bauman». El. # FS 77. 2012. # 48211.
16. Krasovskiy, A. A. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. A. A. Krasovskogo. Moskva: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury. 1987. 712 s.
17. Operations research applications / Eds.: G. Stecca. Rome, Italy: AIRO (Associazione Italiana di Ricerca Operativa), 2017. 123 p.
18. Kolmogorov, A. N. Teoriya informatsii i teoriya algoritmov. Moskva: Nauka, 1987. 304 s.
19. Solomon J. Numerical algorithms: methods for computer vision, machine learning, and graphics: textbook. USA: CRC Press (AK Peters, Ltd.), 2015. 400 p.

УДК 681.3.07

А.М.ХОШАБА

Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины

## ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*В работе рассмотрены преимущества и недостатки некоторые распространенных направлений производительности вычислительных систем (ВС) в которых используются такие модели как идеальные, детерминированные и стохастические.*

*Предложено направление, основанное на детерминированных моделях, имеющие идеальные условия функционирования объекта исследования, где нагруженность самой среды окружения оказывает влияние на количественные и качественные оценки производительности ВС.*

*Определены способы усовершенствования существующих моделей путем введения таких оценок показателей как максимальная пропускная способность и минимальное время ответа (формирование и обработка запроса), показаны их взаимосвязи. Это позволило выполнить дальнейшее изучение взаимосвязей дополнительных показателей производительности ВС: утилизации (Utilization), доступности (Availability), занятости (Busyness) и инертности (Inertness) исследуемой системы, определение временных и скоростных характеристик показателей производительности ВС.*

*Предложены основные критерии отнесения объекта исследования к одному из возможных состояний нагрузочного воздействия. Это позволило определять условия необходимости и достаточности нахождения объекта исследования в конкретном состоянии в отдельный дискретный момент времени.*

*На примере исследования производительности канального уровня стека протоколов TCP/IP определены критерии состояний объекта исследования и их граничные статистические значения. Предложены инструментальные программные средства для проведения исследования. Приведены некоторые важные показатели и их геометрические представления на примере пакета Geogebra.*

*Ключевые слова: производительность вычислительных систем, оценка производительности, нагрузочное воздействие, показатели производительности вычислительных систем, канальный уровень стека протоколов TCP/IP, инструментальные программные средства.*

О.М.ХОШАБА

Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України

## ОЦІНКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*У роботі розглянуті переваги і недоліки деяких поширених напрямків продуктивності обчислювальних систем (ОС) в яких використовуються такі моделі як ідеальні, детерміновані і стохастичні.*

*Запропоновано напрям, що заснований на детермінованих моделях, які мають ідеальні умови функціонування об'єкта дослідження, де навантаженість самого середовища оточення впливає на кількісні та якісні оцінки продуктивності ОС.*

*Визначено способи удосконалення існуючих моделей шляхом введення таких оцінок показників як максимальна пропускна здатність і мінімальний час відповіді (формування і обробка запиту), показані їх взаємозв'язку. Це дозволило виконати подальше вивчення взаємозв'язків додаткових показників продуктивності ОС: утилізації (Utilization), доступності (Availability), зайнятості (Busyness) і інертності (Inertness) досліджуваної системи, визначення тимчасових і швидкісних характеристик показників продуктивності ОС.*

*Запропоновано основні критерії віднесення об'єкта дослідження до одного з можливих станів навантажувального впливу. Це дозволило визначати умови необхідності і достатності знаходження об'єкта дослідження в конкретному стані в окремий дискретний момент часу.*

*На прикладі дослідження продуктивності канального рівня стека протоколів TCP/IP де визначені критерії станів об'єкта дослідження та їх граничні статистичні значення. Запропоновано інструментальні програмні засоби для проведення дослідження. Наведено деякі важливі показники та їх геометричні уявлення на прикладі пакета Geogebra.*

*Ключові слова: продуктивність обчислювальних систем, оцінка продуктивності, навантажувальний вплив, показники продуктивності обчислювальних систем, канальний рівень стеку протоколів TCP/IP, інструментальні програмні засоби.*

O.M.KHOSHABA

Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science

## PERFORMANCE ASSESSMENT OF COMPUTER SYSTEMS

Actual areas of computing performance are the improvement of indicators, the development of new methods and mathematical models for assessing the state of research objects, the study of the qualitative and quantitative characteristics of distributed computing and information resources, the determination of the effectiveness of the parameters of the functioning of the computing systems and many other issues.

In the article there are discusses the advantages and disadvantages of some common areas of performance computing systems that use such models as ideal, deterministic and stochastic.

A direction based on deterministic models has been proposed that have ideal conditions for the operation of the object of study, where the loading of the environment itself has an impact on the quantitative and qualitative assessments of computing performance.

The ways to improve the existing models by introducing indicators such as maximum throughput and minimum response time are defined, and their interrelationships are shown. This made it possible to carry out a further study of the interrelationships of additional computer performance indicators: utilization, availability, busyness and inertness of the system under study and the determination of the time and speed characteristics of the computing performance indicators.

The main criteria for classifying the object of study to one of the possible states of the load effect are proposed. This made it possible to determine the conditions for the necessity and sufficiency of finding the object of research in a particular state at a separate discrete point in time.

Using the example of the performance study of the channel layer of the TCP/IP protocol stack, the criteria for the state of the object of study and their boundary statistical values are determined. The proposed software tools for the study. Some important indicators and their geometric representations are given on the example of the Geogebra package.

The purpose of the article is to review, identify and analyze some common directions of computing performance, ways to improve existing models by introducing additional estimates of indicators and the main criteria for classifying the object of study to one of the possible states of loading effects.

Keywords: performance of computing systems, performance assessments, load impact, performance indicators of computing systems, channel level of the TCP / IP protocol stack, software tools.

### Постановка проблемы

Такою область знаний как производительность вычислительных систем (ВС), которая имеет большое как теоретическую, так и практическую ценность, изучает ряд дисциплин, включая информационную безопасность, надежные и отказоустойчивые системы, разработку и тестирование программных систем, высоконагруженные и распределенные системы и многие другие области знаний. В связи с этим, актуальными направлениями в этой области являются усовершенствование показателей производи-тельности ВС, разработка новых методов и математических моделей оценок состояний объектов исследования, изучение качественных и количественных характеристик распределенных вычислительных и информационных ресурсов, определение эффективности параметров функционирования ВС и многие другие вопросы.

### Анализ последних исследований и публикаций

Существует ряд моделей в области использования детерминированных и вероятностных методов позволяющих получить оценку производительности ВС. Однако, все они имеют как ряд преимуществ, так и недостатков. К первому, наиболее простому и часто используемому относится направление, основанное на детерми-нированных методах (идеальных моделях) определения основных характеристик производительности ВС (табл. 1). Примером идеальной модели может служить оценка производительности пропускной способности канала передачи данных [1], где объем переданной информации  $V$  вычисляется по формуле:

$$V=q \cdot t \quad (1)$$

где  $q$  — пропускная способность канала (биты в секунду или подобные единицы), а  $t$  — время передачи.

Отсюда, зная скорость передачи сообщения, узнают время передачи данных по формуле:

$$t=V/q \quad (2)$$

Более сложными являются примеры [2]. Однако, они тоже основаны на принципах идеальной модели производительности ВС, где пропускная способность канала (Throughput), также как и время ответа (Response Time), является неизменными величинами (константами). Использование данного решения распространено в средних и высших учебных заведениях некоторых стран. К преимуществам данного метода относится его простота и скорость получения оценок основных показателей



производительности ВС. К недостаткам этого решения относят высокую погрешность и сложности определения на практике самих оценок производительности ВС, к примеру, времени ответа.

К наиболее многочисленным случаям на практике использования методов определения основных показателей производительности ВС является второе направление, основанное на стохастических и детерминированных методах исследования. Оценки производительности ВС по данному направлению в основном получают с помощью использования инструментальных методов исследования, к примеру JMeter [3], httpperf [4] и многие другие. К преимуществам данного направления относится простое определение основных показателей производительности ВС, которые рассчитывают на основе экспериментальных данных. К недостаткам данного направления относятся сложности в области анализа оценок и прогнозирования показателей производительности ВС.

К не менее распространенному третьему направлению (табл. 1) исследования производительности ВС относятся модели, оценки которых получены на основе стохастических моделях массового обслуживания [5]. К недостаткам данного направления относят прежде всего ограничения в использовании моделей, которые не позволяют в большинстве случаев их применять.

Таблица 1.

Распространенные решения определения оценок производительности ВС

| Показатели и характеристики | Первое направление                          | Второе направление                        | Третье направление                           |
|-----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Тип методов                 | Детерминированные методы (идеальные модели) | Детерминированные и стохастические методы | Стохастические модели массового обслуживания |
| Время ответа                | Константа                                   | Функция                                   | —                                            |
| Обработка запроса           | —                                           | —                                         | Константа                                    |
| Пропускная способность      | Константа                                   | Функция                                   | Функция                                      |
| Утилизация                  | Константа                                   | Функция                                   | Функция                                      |

В работе предлагается решение, которое является усовершенствованием первого направления (использование идеальных моделей) с помощью некоторых поправок и дальнейшего развития стандартных методов производительности ВС.

### Цель исследования

Целью статьи является рассмотрение, определение и анализ некоторых распространенных направлений производительности ВС, способы усовершенствования существующих моделей путем введения дополнительных оценок показателей и основных критериев для отнесения объекта исследования к одному из возможных состояний нагрузочного воздействия.

### Определение качественных оценок производительности ВС

В области производительности ВС структуру самого запроса можно разделять на клиентскую и серверную части. В функции клиентской части ( $\Omega$ ) входит формирование запроса [6]. К функциям серверной части ( $\mu$ ) принадлежат получение, обработка и отправка запроса. Клиентская и серверная части могут физически находиться на одном сервере, локальной или корпоративной сети. Однако, чаще всего временем на транспортные издержки, связанные с передачей и получением запроса в исследованиях пренебрегают. Относительно серверной и клиентской частей применяют качественные и количественные оценки.

Качественная оценка (табл. 2, столбец 2) относительно разработанных критериев [7,8] производительности ВС основывается на определении трех состояний объекта исследования. К таким критериям относятся очередь запросов (*request queue*,  $Q_u$ ) и (*presence of errors*,  $Err$ ). На их основе выполняются вычисления качественных и количественных показателей производительности ВС.

Таблица 2.

Критерии определения состояний объекта исследования

| Обозначение состояния | Название состояния | Критерий определения состояния                 | Условия отнесения к состоянию |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| S1                    | Низкая нагрузка    | Отсутствие очереди запросов, отсутствие ошибок | Синхронные запросы            |
| S2                    | Умеренная нагрузка | Появление очереди запросов, отсутствие ошибок  | Асинхронные запросы           |
| S3                    | Высокая нагрузка   | Появление ошибок, потеря запросов              | Асинхронные запросы           |

Такая важная характеристика запросов как синхронность/асинхронность позволяет сформировать условия принадлежности объекта исследования к рассматриваемым состояниям (табл. 2):

- синхронные запросы как необходимое и достаточное условие для состояния S1;
- асинхронные запросы как необходимое и недостаточное условие для состояния S2;
- асинхронные запросы как необходимое и достаточное условие для состояния S3.

Как к серверной, так и к клиентской частей запроса в каждом из состояний (табл. 2) применяются такие основные показатели производительности как пропускная способность (*Throughput*,  $Th$ ) и время ответа (*Response Time*,  $RT$ ).

Таким образом, к скорости формирования запроса на клиентской части применяется два основных показателя производительности ВС: пропускная способность ( $\Omega_{Th}$ ) и время ответа ( $\Omega_{RT}$ ). В то же время, к серверной части запроса используется также два основных показателя производительности ВС (табл. 3): пропускная способность ( $\mu_{Th}$ ) и время ответа ( $\mu_{RT}$ ).

Поэтому, пропускная способность запросов клиентской части ( $\Omega_{Th}$ , [gps]) - это количественная оценка сформированных запросов, которые поступают на серверную часть (сервисы компьютерной сети, уровни протокола TCP/IP и т.д.).

Пропускная способность запросов серверной части ( $\mu_{Th}$ , [gps]) - это количественная оценка запросов, которые обрабатываются на серверной части.

Время формирования поступающего запроса на клиентской части ( $\Omega_{RT}$ , [с]) - это количественная оценка времени формирования одного запроса.

Время обработки одного запроса на серверной части ( $\mu_{RT}$ , [с]) - это количественная оценка времени ответа по одному запросу.

Таблица 3.

Структура запросов основных показателей производительности ВС

| Компоненты запроса | Показатели производительности ВС             |                                       |
|--------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
|                    | Пропускная способность ( <i>Throughput</i> ) | Время ответа ( <i>Response Time</i> ) |
| Клиентская часть   | $\Omega_{Th}$ , [gps]                        | $\Omega_{RT}$ , [с]                   |
| Серверная часть    | $\mu_{Th}$ , [gps]                           | $\mu_{RT}$ , [с]                      |

Значения этих показателей (табл. 3) отличаются от значений основных показателей производительности ВС идеальных моделей (табл. 1) тем, что они не являются константами и не имеют достоверных корреляционных связей.

Также, существуют дополнительные показатели производительности ВС, которые основаны на граничных значениях (табл. 2). К ним относятся показатели, имеющие максимальную пропускную способность (*Bandwith*,  $Bw$ ) и минимальное время ответа (*Processing time*,  $PT$ ) для клиентской и серверной частей запроса.

Таблица 4.

Компоненты запроса дополнительных показателей производительности ВС

| Компоненты запроса | Показатели производительности ВС                        |                                                     |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                    | Максимальная пропускная способность ( <i>Bandwith</i> ) | Минимальное время ответа ( <i>Processing Time</i> ) |
| Клиентская часть   | $\Omega_{Bw}$ , [gps]                                   | $\Omega_{PT}$ , [с]                                 |
| Серверная часть    | $\mu_{Bw}$ , [gps]                                      | $\mu_{PT}$ , [с]                                    |

Таким образом, максимальная пропускная способность клиентской части ( $\Omega_{Bw}$ , [gps]) - это количественная оценка максимальных запросов, которые могут быть сформированы за единицу времени:

$$\Omega_{Bw} = \max_{Th} \{\Omega_{Th}\} \quad (3)$$

$$\lim_{Th \rightarrow \infty} \Omega_{Th} = \Omega_{Bw} \quad (4)$$

Максимальная пропускная способность серверной части ( $\mu_{Bw}$ , [gps]) - это количественная оценка максимально возможных запросов, которые могут быть обработаны на серверной части за единицу времени:

$$\mu_{Bw} = \max_{Th} \{\mu_{Th}\} \quad (5)$$

$$\lim_{Th \rightarrow \infty} \mu_{Th} = \mu_{Bw} \quad (6)$$

Минимальное время формирования запроса клиентской части ( $\Omega_{PT}$ , [с]) - это количественная оценка минимально возможного времени формирования одного запроса:

$$\Omega_{PT} = \min_{RT} \{\Omega_{RT}\} \quad (7)$$

$$\lim_{RT \rightarrow 0} \Omega_{RT} = \Omega_{PT} \quad (8)$$

Минимальное время ответа на один запрос серверной части ( $\mu_{PT}$ , [с]) - это количественная оценка минимально возможного времени обработки одного запроса:

$$\mu_{PT} = \min_{RT} \{\mu_{RT}\} \quad (9)$$

$$\lim_{RT \rightarrow 0} \mu_{RT} = \mu_{PT} \quad (10)$$

Дополнительные показатели производительности ВС имеют следующие соотношения и ограничения:

$$\Omega_{Bw} = 1/\Omega_{PT} \quad (11)$$

$$\Omega_{PT} = 1/\Omega_{Bw} \quad (12)$$

$$\mu_{Bw} = 1/\mu_{PT} \quad (13)$$

$$\mu_{PT} = 1/\mu_{Bw} \quad (14)$$

$$\Omega_{Bw} \geq \Omega_{Th} \quad (15)$$

$$\mu_{PT} \leq \mu_{RT} \quad (16)$$

В связи с имеющимися четырьмя оценками (11-14), возможно получить другие дополнительные показатели производительности ВС, к которым относятся утилизация (*Utilization*,  $U$ ), доступность (*Availability*,  $A$ ), занятость (*Busyness*,  $B$ ) и инертность (*Inertness*,  $I$ ) системы. Исходя из соотношений (11-14), возможно получить следующие выражения для серверной части структуры запроса:

$$U\mu = \mu_{Th} / \mu_{Bw} \quad (17)$$

$$U\mu = 1 - A\mu \quad (18)$$

$$A\mu = 1 - U\mu \quad (19)$$

$$B\mu = \mu_{PT} / \mu_{RT} \quad (20)$$

$$I\mu = 1 - U\mu \quad (21)$$

$$U\mu = 1 - I\mu \quad (22)$$

К параметрам производительности ВС, являющимися количественными оценками, относятся скорость поступления или времени ответа на запрос ( $v$ ), изменение скорости поступления или времени ответа на запрос ( $a$ ), общее количество выполненных или обработанных запросов ( $w$ ). Применительно к скорости формирования запросов примем следующее соотношение:

$$v = \Omega_{Th} \quad (23)$$

Тогда, с помощью следующих соотношений опишем параметры производительности ВС в случае формирования запросов к серверной части:

$$v = w' \quad (24)$$

$$a = v' \quad (25)$$

$$ad = a' \quad (26)$$

Оценки скорости формирования запроса ( $V$ ), изменения скорости формирования запроса ( $A$ ), общего количества сформированных запросов ( $W$ ) определяются следующим образом:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \quad (27)$$

$$A = \int_{t_1}^{t_2} ad(t) dt \quad (28)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (29)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  время начала и окончания формирования запроса к серверной части соответственно.

Используя критерии определения состояний объекта исследования (табл. 2) можно получить временные и скоростные производительности ВС, к которым относятся точка и время затора (30, 31), точка и время отказа (32, 33) и мощность состояния объекта исследования (34) для различных состояний.

К примеру, для состояний S1 - S2 примем точку ( $\mu_{Bw}^{S1}$ , 30) и время ( $\mu_{PT}^{S1}$ , 31) затора:

$$\lim_{Th \rightarrow \infty} \mu_{Th}^{S1} = \mu_{Bw}^{S1}, \text{ при } Qu = 0, Err = 0 \quad (30)$$

$$\lim_{RT \rightarrow 0} \mu_{RT}^{S1} = \mu_{PT}^{S1}, \text{ при } Qu = 0, Err = 0 \quad (31)$$

Для состояний S2 - S3 примем точку ( $\mu_{Bw}^{S2}$ , 32) и время ( $\mu_{PT}^{S2}$ , 33) отказа:

$$\lim_{Th \rightarrow \infty} \mu_{Th}^{S2} = \mu_{Bw}^{S2}, \text{ при } Qu > 0, Err = 0 \quad (32)$$

$$\lim_{RT \rightarrow 0} \mu_{RT}^{S2} = \mu_{PT}^{S2}, \text{ при } Qu > 0, Err = 0 \quad (33)$$

$$P_{SN} = W / (t_2 - t_1) \quad (34)$$

Мощность нагрузочного воздействия объекта исследования (34) для состояния  $S_N$  может определяться как выполненная работа (29) за единицу времени. Мощность нагрузочного воздействия

может объясняться величиной нагруженности объекта исследования и способностью сопротивления программно-технического комплекса к нагрузочным воздействиям.

### Определение оценок показателей производительности вычислительных систем на примере исследования канального уровня стека протокола TCP/IP

Для исследования канального уровня стека протокола TCP/IP в корпоративной сети ставится следующая задача: определить оценки производительности ВС с помощью выполнения синхронных и асинхронных запросов стандартной для передачи данных длины (64 байта) к серверу компьютерной сети.

Решение данной задачи сводится к следующему. После анализа инструментальных средств исследования канального уровня стека протокола TCP/IP определены две утилиты: ping - для выполнения синхронных запросов, nping - для выполнения асинхронных запросов.

После проведения ряда экспериментов определены параметры команд для выполнения синхронных запросов:

```
$ ping -c 10 coll
```

Для выполнения асинхронных запросов:

```
$ nping -rate=1000 -c 100 coll
```

```
$ nping -rate=1100 -c 100 coll
```

Работа данных команд показана на рис. 1.

```
khoshaba@c204:~
File Edit View Search Terminal Help
[khoshaba@c204 ~]$ ping -c 10 coll
PING coll.ci.lan (10.0.0.33) 56(84) bytes of data.
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=1 ttl=64 time=0.271 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=2 ttl=64 time=0.350 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=3 ttl=64 time=0.342 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=4 ttl=64 time=0.261 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=5 ttl=64 time=0.317 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=6 ttl=64 time=0.344 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=7 ttl=64 time=0.279 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=8 ttl=64 time=0.332 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=9 ttl=64 time=0.357 ms
64 bytes from coll.ci.lan (10.0.0.33): icmp_seq=10 ttl=64 time=0.335 ms

--- coll.ci.lan ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9002ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.261/0.318/0.357/0.040 ms
[khoshaba@c204 ~]$
```

а)

```
khoshaba@c204:/home/khoshaba
File Edit View Search Terminal Help
SENT (0.1128s) ICMP [10.0.0.204 > 10.0.0.33 Echo request (type=8/code=0) id=62438 seq=99] IP [
ttl=64 id=31397 iplen=28 ]
RCVD (0.1129s) ICMP [10.0.0.33 > 10.0.0.204 Echo reply (type=0/code=0) id=62438 seq=99] IP [t
tl=64 id=25445 iplen=28 ]
SENT (0.1138s) ICMP [10.0.0.204 > 10.0.0.33 Echo request (type=8/code=0) id=62438 seq=100] IP
[ttl=64 id=31397 iplen=28 ]
RCVD (0.1139s) ICMP [10.0.0.33 > 10.0.0.204 Echo reply (type=0/code=0) id=62438 seq=100] IP [t
tl=64 id=25446 iplen=28 ]
SENT (0.1148s) ICMP [10.0.0.204 > 10.0.0.33 Echo request (type=8/code=0) id=62438 seq=100] IP
[ttl=64 id=31397 iplen=28 ]
RCVD (0.1150s) ICMP [10.0.0.33 > 10.0.0.204 Echo reply (type=0/code=0) id=62438 seq=100] IP [t
tl=64 id=25447 iplen=28 ]

Max rtt: 1.745ms | Min rtt: 0.074ms | Avg rtt: 0.131ms
Raw packets sent: 100 (2.800KB) | Rcvd: 100 (4.600KB) | Lost: 0 (0.00%)
Nping done: 1 IP address pinged in 0.12 seconds
[root@c204 khoshaba]#
```

б)

Рисунок 1. Результаты выполнения команд для определения оценок производительности ВС (а - выполнение синхронных запросов, б - асинхронных)

После получения и обработки данных результаты исследования заносятся в таблицу (табл. 5).

Таблиця 5.

| Результаты обработки данных |                             |                                                |                                         |         |               |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|---------------|
| Тип передачи данных         | Состояние канального уровня | Мощность нагрузочного воздействия (10E6 [tps]) | Время ответа (Response Time, 10E-3 [с]) |         |               |
|                             |                             |                                                | Минималь-ные                            | Средние | Максималь-ные |
| Синхронный                  | S1                          | 0.52                                           | 0.261                                   | 0.318   | 0.357         |
| Асинхронный                 | S2                          | 6.47                                           | 0.074                                   | 0.131   | 1.745         |
| Асинхронный                 | S3                          | 49.80                                          | 0.01                                    | 0.066   | 2.4           |

После статистической обработки данных осуществляется их анализ и получение оценок производительности ВС по вышеуказанным соотношениям.

При анализе данных обращает на себя внимание (табл. 5) увеличение дисперсии и средние квадратического отклонения величин, которые наблюдаются при возрастании состояний объекта исследования.

Исходя из анализа объекта исследования временных и скоростных характеристик (30-33) показателей производительности будут следующими:

- точка затора:  $3.83 \cdot 10^3$  [tps];
- время затора: 1 [с];
- точка отказа:  $0.1 \cdot 10^5$  [tps];
- время отказа:  $0.1 \cdot 10^{-4}$  [с].

Вычисление основных и дополнительных оценок не являются достаточно сложными и могут выполняться с помощью распространенных математических пакетов. Например, расчеты мощности нагрузочного воздействия (34) могут проводиться с использованием школьных инструментальных средств - Geogebra (рис. 2).

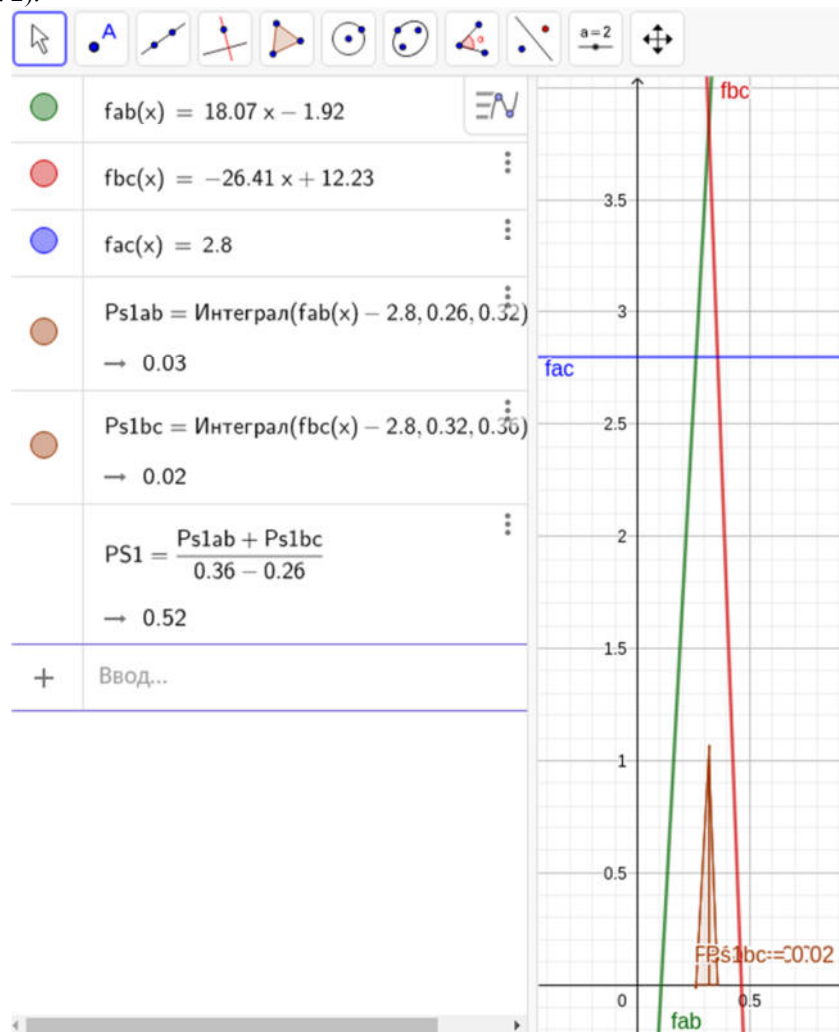


Рис. 2. Геометрическое представление и алгебраические вычисления оценки мощности нагрузочного воздействия для состояния S1



На рис. 2 представлено геометрическое представление и алгебраические вычисления для получения оценки мощности нагрузочного воздействия состояния S1.

Более сложные исследования в области моделирования оценок производительности систем могут выполняться в профессиональных математических средах [9].

### Выводы

В работе рассмотрены преимущества и недостатки некоторых распространенных направлений производительности ВС в которых используются такие модели как идеальные, детерминированные и стохастические.

Предложено направление, основанное на детерминированных моделях, имеющие идеальные условия функционирования объекта исследования, где нагруженность самой среды окружения оказывает влияние на количественные и качественные оценки производительности ВС.

Определены способы усовершенствования существующих моделей путем введения таких оценок показателей как максимальная пропускная способность и минимальное время ответа (формирование и обработка запроса), показаны их взаимосвязи. Это позволило выполнить дальнейшее изучение взаимосвязей дополнительных показателей производительности ВС: утилизации (Utilization), доступности (Availability), занятости (Busyness) и инертности (Inertness) исследуемой системы, определение временных и скоростных характеристик показателей производительности ВС.

Предложены основные критерии отнесения объекта исследования к одному из возможных состояний нагрузочного воздействия. Это позволило определять условия необходимости и достаточности нахождения объекта исследования в конкретном состоянии в отдельный дискретный момент времени.

На примере исследования производительности канального уровня стека протоколов TCP/IP определены некоторые важные показатели и их геометрические представления на примере пакета Geogebra.

### Список использованной литературы

1. Скорость передачи информации и пропускная способность канала связи : URL: <https://personal.onlyoffice.com/products/files/doceditor.aspx?fileid=app-gdrive%7c19uaD6EzDSS0E3ukgILZ9uTzvZivOD2mw> (дата обращения: 15.03.2019)
2. Скорость передачи информации : URL: <https://www.yaklass.ru/p/informatika/10-klass/informatciia-i-informatcionnye-protcessy-11955/skorost-peredachi-informatcii-12138> (дата обращения: 15.03.2019)
3. Apache JMeter : URL: <https://jmeter.apache.org/> (дата обращения: 15.03.2019)
4. The httpperf HTTP load generator : URL: <https://github.com/httpperf/httpperf> (дата обращения: 15.03.2019)
5. Moreno Marzolla. The queueing Package. Queueing Networks analysis with GNU Octave. URL: <http://www.cs.unibo.it/~donat/octave-queueing-package.pdf> (дата обращения: 15.03.2019)
6. Хошаба А.М. Моделирование производительности вычислительных систем на основе моделей и программных средств. Геометричне моделювання та інформаційні технології. Миколаїв, 2018. №2(6). С. 94-98.
7. Хошаба А.М. Моделирование состояний при нагрузочных воздействиях на сервисы вычислительной системы : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. "Математичне та імітаційне моделювання систем" (м. Жукин, 25 - 29 червн. 2018 р.). Жукин, 2018. С. 269-272.
8. Хошаба А.М. Исследование процессов нагрузочных воздействий и восстановлений производительности вычислительных систем. Прикладні питання математичного моделювання. Херсон, 2018. №1. С. 178-185.
9. Хошаба О.М. Автоматизация проведения нагрузочных воздействий на прикладные сервисы для моделирования вычислительных систем : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 22-23 берез. 2018 р. Миколаїв, 2018. С. 94-96.

### References

1. Skorost peredachi informatsii i propusknaya sposobnost kanala svyazi : URL: <https://personal.onlyoffice.com/products/files/doceditor.aspx?fileid=appgdrive|19uaD6EzDSS0E3ukgILZ9uTzvZivOD2mw> (data obrascheniya: 15.03.2019)
2. Skorost peredachi informatsii : URL: <https://www.yaklass.ru/p/informatika/10-klass/informatciia-i-informatcionnye-protcessy-11955/skorost-peredachi-informatcii-12138> (data obrascheniya: 15.03.2019)
3. Apache JMeter : URL: <https://jmeter.apache.org/> (data obrascheniya: 15.03.2019)
4. The httpperf HTTP load generator : URL: <https://github.com/httpperf/httpperf> (data obrascheniya: 15.03.2019)
5. Moreno Marzolla. The queueing Package. Queueing Networks analysis with GNU Octave. URL: <http://www.cs.unibo.it/~donat/octave-queueing-package.pdf> (data obrascheniya: 15.03.2019)

6. Hoshaba A.M. Modelirovanie proizvoditelnosti vyichislitelnyih sistem na osnove modeley i programmnyih sredstv. Geometrichne modelyuvannya ta InformatslynI tehnologIYi. MikolaYiv, 2018. #2(6). S. 94-98.
7. Hoshaba A.M. Modelirovanie sostoyaniy pri nagruzochnyih vozdeystviyah na servisyi vyichislitelnoy sistemyi : tezi dop. mIzhnar. nauk.-prakt. konf. "Matematichne ta ImItatslyne modelyuvannya sistem" (m. Zhukin, 25 - 29 chervn. 2018 r.). Zhukin, 2018. S. 269-272.
8. Hoshaba A.M. Issledovanie protsessov nagruzochnyih vozdeystviy i vosstanovleniy proizvoditelnosti vyichislitelnyih sistem. PrikladnI pitannya matematichnogo modelyuvannya. Herson, 2018. #1. S. 178-185.
9. Hoshaba O.M. Avtomatizatsiya provedeniya nagruzochnyih vozdeystviy na prikladnyie servisyi dlya modelirovaniya vyichislitelnyih sistem : zb. tez dop. mIzhnar. nauk.-prakt. konf., m. MikolaYiv, 22-23 berez. 2018 r. MikolaYiv, 2018. S. 94-96.

---

**ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ШКОЛИ**

---

УДК 37.091.12:004.7

Л.В.КУЗЬМИЧ, Н.В.ВАЛЬКО

Херсонський державний університет

**ІНТЕРПРЕТАЦІЯ, МОДЕЛЬ, МЕТОДИ ДОВЕДЕНЬ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ –  
ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ МІЖПРЕДМЕТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ПРИ ВИВЧЕННІ  
МАТЕМАТИКИ**

*Проаналізовано деякі твердження і поняття, що лежать в основі міжпредметних зв'язків при вивченні різних розділів вищої математики та прикладних наук. Розглянуто елементи найефективнішого засобу пізнання законів і закономірностей навколишнього світу - моделювання та деякі взаємозв'язки математичних моделей природознавства та економіки. Окреслено один із нових способів організації навчання - STEM-освіту для розв'язання завдання посилення підготовки учнів та студентів у галузі природничо-математичної освіти.*

**Ключові слова:** аксіоматична теорія, інтерпретація, модель, методи досліджень та доведень, міжпредметний зв'язок, STEM-освіта..

Л.В.КУЗЬМИЧ, Н.В.ВАЛЬКО

Херсонский государственный университет

**ІНТЕРПРЕТАЦІЯ, МОДЕЛЬ, МЕТОДИ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ И ИССЛЕДОВАНИЙ –  
ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖПРЕДМЕТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МАТЕМАТИКИ**

*Проанализированы некоторые утверждения и понятия, лежащие в основе межпредметных связей при изучении различных разделов высшей математики и прикладных наук. Рассмотрены элементы эффективного средства познания законов и закономерностей окружающего мира - моделирование и некоторые взаимосвязи математических моделей естествознания и экономики. Указано на один из новых путей организации обучения - STEM-образование для решения задачи усиления подготовки учащихся и студентов в области естественно-математического образования.*

**Ключевые слова:** аксиоматическая теория, интерпретация, модель, методы исследований и доказательств, межпредметная связь, STEM-образование.

L.KUZMICH, N.VALKO

Kherson State University

**INTERPRETATION, MODEL, METHODS OF EVIDENCE AND RESEARCH - WAYS OF  
IMPLEMENTATION OF INTER-DISCIPLINARY CONNECTIONS IN MATHEMATICS**

*In mathematical science with the axiomatic construction of various mathematical theories, three important concepts are closely related: interpretation, model, and proof. The study of the properties of the axiomatic theory takes place through interdisciplinary connections through the interpretation, model, various methods of evidence and research. Modern science is characterized by the intensive penetration of mathematical methods of research in various fields of scientific thought, in other fields of knowledge, in particular in natural sciences, economics, technology, social sciences and other sciences, from purely humanitarian disciplines to sociology, applied linguistics, and ecology. This article analyzes some of the assertions and concepts that underlie interdisciplinary connections in the study of various sections of higher mathematics and applied sciences. Elements of an effective means of knowledge of the laws of the world around the world are considered - modeling and some interconnections of mathematical models of science and economics. One of the new ways of teaching is outlined - STEM-education to address the problem of increasing the training of students and students in the field of natural and mathematical education, which contributes to the development of abilities for research, analytical work, experimentation and critical study. thinking. The STEM-oriented approach to learning contributes to promoting engineering and technology professions among young people, raising awareness of their career opportunities in technology and technology, and building a sustainable motivation to learn the disciplines on which STEM education is based. Implementation of STEM educational approaches in general education institutions requires systematic educational activities among teachers, development of ready-made methods for carrying out occupations and scenarios of activities. The technical basis for such a study should be the use of IT technology, as the simulation process is carried out through a variety of specialized computer programs.*

**Key words:** *axiomatic theory, interpretation, model, methods of research and proof, interdisciplinary connection.*

### Постановка проблеми

Основні задачі навчання змінюються відповідно до технологій, які наявні чи виникають та розвиваються в даний проміжок часу. STEM-освіта є перспективним напрямом реалізації навчальної діяльності в рамках викликів XXI століття. Реалізація нових стандартів навчання забезпечує глибоке розуміння предмету дослідження, міждисциплінарність знань та вмінь. Задачі і проблеми, які мають великий вплив на розвиток наукових положень математики, дають можливість зробити аналіз застосування різноманітних методів як у дослідженні абстрактної математичної теорії, так і в процесі викладання відповідної навчальної дисципліни (наприклад, алгебри, геометрії і теорії функцій), а також застосування математичних моделей у прикладних науках (технічних, природничих, економічних).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання, що пов'язані із застосуванням математики, розглядалися в роботах Г. Бібік, Д. Гільберта, В. Глушкова, Е. Енглера, Л. Канторовича, Н. Кушнір, А. Робінсона, Р. Сикорського, В. Шарко, Ю. Янова та багатьох інших. Зазначимо, що теорія доведень, моделювання в математиці є об'єктом самостійного дослідження (конструктивна математика) [3; 6; 7; 8].

Сучасна математика стала більш абстрактною, що вимагає певних трансформацій відповідного навчального курсу, нових підходів до її застосування. У зв'язку з цим, наприклад, щодо алгебри достатньо згадати появу теорій категорій, формацій, многовидів, булевих алгебр, абстрактної теорії алгебраїчних систем. Математичний аналіз також збагатився новими ідеями і методами, що призвело до появи нових дисциплін (функціональний аналіз, конструктивна теорія функцій, теорія диференціальних й інтегральних операторів та ін.). Слід також зазначити про появу абстрактної теорії ймовірностей, теорії випадкових процесів, математичну теорію катастроф і т. п. Аналіз основ евклідової геометрії привів до появи ряду неевклідових геометрій (гіперболічної, ріманової, проективної, простору сталої кривизни та ін.) [1, с. 5 – 350; 6, 9].

**Мета дослідження** – проаналізувати деякі поняття математики, що пов'язані з аксіоматичною побудовою наук та проблемою інтерпретації, моделювання, доведення в математичних теоріях. Розглянути деякі взаємозв'язки математичних моделей природознавства та економіки.

### Виклад основного матеріалу

Розвиток цифрових технологій та впровадження їх у всі сфери життя суспільства визначає потребу у фахівцях різних галузей з високим рівнем володіння інженерно-математичними знаннями, розумінням фізичних, економічних та інформаційних процесів. Соціально значущим завданням стає посилення підготовки учнів та студентів у галузі природничо-математичної освіти, що обумовлює пошук нових шляхів організації навчання. Одним із шляхів розв'язання поставленого педагогічного завдання є STEM-освіта – послідовність інтегрованих курсів або програм навчання, яка готує учнів до продовження освіти після школи або успішного працевлаштування, вимагає різних і більш технічно складних навичок, зокрема із застосуванням математичних знань і наукових понять. Акронім STEM вживається для позначення популярного напрямку в освіті, що охоплює природничі науки (Science), технології (Technology), технічну творчість (Engineering) та математику (Mathematics). Це напрям в освіті, при якому в навчальних програмах посилюється природничо-науковий компонент у поєднанні з інноваційними технологіями. Впровадження STEM-освіти сприяє розвитку здібностей до дослідницької, аналітичної роботи, експериментування та критичного мислення [10, с. 248].

У математичній науці з аксіоматичною побудовою різноманітних математичних теорій тісно пов'язані три важливих поняття – інтерпретація, модель, доведення.

Під інтерпретацією розуміють непусту множину  $A$  елементів конкретної природи (область інтерпретації) і яку-небудь залежність, яка  $n$ -місним предикатам або функціям від  $n$  змінних даної математичної теорії ставить у відповідність деякі  $n$ -арні відношення та операції на множині  $A$  [1, с. 117].

Інтерпретація є моделлю математичної теорії (множини формул), якщо кожна формула цієї теорії (множини) істинна в даній інтерпретації.

Послідовність логічних тверджень  $A_1, A_2, \dots, A_n$  називається доведенням  $A_n$ , якщо кожне  $A_i, i = \overline{1, n}$ , є або аксіомою розглядуваної теорії, або наслідком одного чи більшої кількості попередніх тверджень, що отримані за логічними правилами виведення.

Вивчення властивостей аксіоматичної теорії відбувається через міжпредметні зв'язки за допомогою інтерпретації, моделі, різних методів доведень та досліджень. Дійсно, формула математичної теорії має сенс лише тоді, коли є яка-небудь інтерпретація символів, що входять до неї, а в якості області інтерпретації розглядається множина елементів конкретної природи «раніше вивченої теорії». Кожна аксіоматична математична теорія вимагає вияснення питань її несуперечності і категоричності.

Для цього необхідно побудувати модель даної теорії та довести, що будь-які дві моделі цієї теорії ізоморфні. В якості моделей зазвичай використовуються об'єкти добре вивчених теорій. Так, наприклад, в алгебрі теорії груп, кілець, полів, векторних просторів використовують моделі з числових систем, теорії многочленів, теорії функцій, геометрії – як групи рухів, фізики твердого тіла (кристалічні решітки), теорії елементарних частин, квантової механіки (рис. 1). У свою чергу, в багатьох природничих науках застосовуються результати з теорії груп, кілець, полів, векторних просторів для обґрунтування і доведення тих чи інших закономірностей.



Рис. 1

Моделі дозволяють виявити ряд властивостей теорії, що вивчається, через інтерпретацію на даній моделі, тобто одна математична теорія може бути моделлю для іншої теорії. Отже, поняття математичної моделі є відносним. Наприклад, вивчивши в алгебрі властивості арифметичного  $n$ -вимірного векторного простору, можна узагальнити їх на довільні  $n$ -вимірні векторні простори над полем дійсних чисел, тобто повністю вивчити теорію цих просторів.

Але одна й та ж математична теорія може реалізовуватися у різних моделях. Наприклад: теорія лінійного простору  $V^3$  розмірності  $n = 3$  над заданим полем має наступні інтерпретації (моделі), які детально вивчаються в навчальному курсі лінійної алгебри: арифметична модель над полем дійсних чисел  $R$ , простір паралельних перенесень, простір направлених відрізків; у курсі функціонального аналізу об'єктом дослідження є теорія абстрактного гільбертового простору  $H$ , основними моделями якого є: множина всіх послідовностей  $\{z_n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , комплексних чисел  $z_n$ , таких, що наступний ряд  $\sum_1^\infty z_n^2$  є збіжним; простір  $C^2[0;1]$  – простір комплексних функцій, визначених і вимірних на відрізку  $[0;1]$  й інтегрованих у квадраті [6, с. 142]; у курсі алгебри прикладами моделей теорії груп є групи симетрій правильних многогранників, групи перетворень, числові групи, групи підстановок [5, с. 171-190]; у навчальному курсі геометрії досліджуються моделі гіперболічної площини Пуанкаре та Келі-Клейна [1] (рис. 2).



Рис. 2

Побудова різноманітних моделей (інтерпретацій) математичної теорії та їх застосувань у навчальних математичних дисциплінах є одним із завдань цих досліджень щодо встановлення міжпредметних зв'язків, а також обґрунтування доцільності (з огляду на педагогіку) використання конкретної моделі в навчальному процесі. Так, наприклад, у навчальному процесі розглядаються моделі векторного простору над фіксованим полем  $R$ ; моделі функціонального простору; метричного простору;



ймовірнісного простору; проективного простору; теорії булевих алгебр. Зокрема, для теорії булевих алгебр існують такі інтерпретації (моделі): алгебра подій, алгебра висловлень, алгебра множин. У свою чергу, алгебра подій як ймовірнісний простір має класичну, дискретну, геометричну і теоретико-множинну моделі (табл. 1).

Таблиця 1

| Інтерпретація 1                                     | Інтерпретація 2    | Інтерпретація 3    |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Моделі векторного простору над фіксованим полем $P$ | ...                |                    |
| Моделі функціонального простору                     | ...                |                    |
| Метричного простору                                 | ...                |                    |
| Ймовірнісного простору                              | ...                |                    |
| Проективного простору                               | ...                |                    |
| Теорії булевих алгебр                               | Алгебра подій      | класична           |
|                                                     |                    | дискретна          |
|                                                     |                    | геометрична        |
|                                                     |                    | теоретико-множинна |
|                                                     | Алгебра висловлень | ...                |
|                                                     | Алгебра множин     | ...                |

Методи алгебри логіки використовуються в аналітичній геометрії, і, навпаки. Наприклад, геометрична інтерпретація формул булевої алгебри дає можливість розв'язати задачі про побудову рівняння межі довільної області  $D$  за заданою логікою її побудови при допомозі областей  $D_1, D_2, \dots, D_n$ . За допомогою предикатів можна описати об'єкти, що входять у геометричну задачу, і звести її до алгебраїчної задачі, що записана мовою формул. З іншого боку, при розв'язуванні багатьох аналітичних задач математики та інших прикладних наук користуються їхньою геометричною інтерпретацією. Тому аналітичну геометрію можна вважати мостом між алгеброю, логікою та геометрією. Використовуючи властивості груп, у теорії чисел можна ефективно і просто довести теореми Ейлера, Ферма, Вільсона та ряд інших тверджень [2; 12].

Ортогональні перетворення квадратичних форм у алгебрі дозволяють дослідити в аналітичній геометрії криві та поверхні другого порядку [5, с. 502-519].

Важливе значення при вивченні математичної теорії має вибір методу доведення та дослідження. Звичайно, поняття твердження у формальній аксіоматичній теорії суттєво відрізняється від доведення теорем у навчальних курсах математичних дисциплін. Найефективнішими є ті методи, що використовують міжпредметні зв'язки. Наприклад, властивості первісних коренів  $n$ -го степеня з одиниці в теорії комплексних чисел знаходять найширше застосування при вивченні функції Ейлера, побудові многочлена поділу круга, в дослідженні ряду питань алгебри і теорії чисел, теорії груп.

Іноді для доведення деяких тверджень доцільно побудувати модель, на якій не виконується це твердження. Наприклад, фундаментальна послідовність раціональних чисел  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$  не має раціональної границі. Звідси випливають наступні результати: поле раціональних чисел не є повним і фундаментальність послідовності не є достатньою ознакою збіжності послідовності в полі раціональних чисел [3, с. 48].

Строго логічний виклад математичних теорій, їхнє обґрунтування та зв'язок з іншими предметами, практичне застосування цих теорій є найважливішою стороною навчання математики, і викладені вище шляхи реалізації міжпредметних зв'язків сприяють розвитку логічного мислення студентів і формуванню наукового потенціалу майбутнього учителя математики.

Сучасна наука характеризується інтенсивним проникненням математичних методів дослідження у різні сфери наукової думки, в інші галузі знань, зокрема, в природничі, економічні, технічні, соціальні та інші науки, – від суто гуманітарних дисциплін до таких, як соціологія, прикладна лінгвістика, екологія. Як науки про об'єктивні закони розвитку природознавства, економіки, суспільства, вони постійно користуються різноманітними кількісними характеристиками, і тому акумулюють у собі низку математичних методів. Активність же наукових досліджень у різних галузях стає рушійною силою для математиків у подальшому розвитку математичного інструментарію. Так, за допомогою навіть основних елементарних функцій та їх комбінацій можна математично дослідити і описати різноманітні зв'язки між біологічними та екологічними об'єктами (елементами), що були встановлені протягом усього розвитку біологічної науки, зокрема екології. Без застосування елементарних функцій при формалізації

конкретних закономірностей у природі (або інших галузях) процес дослідження був би неповним, неприродним, а то й неможливим. Наприклад, лінійна залежність між двома величинами (об'єктами, фактами) у природі зустрічається досить нечасто. Але за певних обмежень, умов лінійна залежність між двома змінними може існувати. Наприклад, протягом певного часу на ранній стадії свого розвитку вага (довжина) деяких риб лінійно залежить від їхнього віку, тоді її можна знайти за формулою  $m = kt$  (або  $l = at$ ), де коефіцієнт пропорційності (параметр)  $k$  ( $a$ ) залежить від виду риби і визначається за даними емпіричних досліджень ( $\epsilon$  сталою величиною),  $t$  - проміжок часу,  $m$ ,  $l$  - відповідно маса та довжина, а залежність для їхнього знаходження є прямо пропорційною. Між деякими об'єктами існує обернена пропорційна залежність (модель типу «хижак - жертва»: вовк - заєць, кіт - миша, ...), яку можна задати функцією оберненої пропорційності  $N_z = \frac{k}{N_v}$ , де  $N_z$  - число (кількість популяції) зайців (жертв) у певному періоді,  $N_v$  - число вовків (хижаків), параметр  $k$  - коефіцієнт оберненої пропорційності, що визначається за даними емпіричних досліджень. У біології залежність між кількістю їжі та швидкістю її споживання для деяких мікроорганізмів можна задати дробово-раціональною функцією виду  $y = \frac{ax+b}{cx+d}$ , а швидкість розмноження популяції - за допомогою степеневих функцій виду  $y = ax^n$ . Розмноження більшості бактерій описується показниковою (експоненціальною) залежністю виду  $y = Ae^x$ . Деякі процеси у природі можна вважати періодичними (майже періодичними, квазіперіодичними), наприклад, зміна температури повітря, води у водоймах та на поверхні землі за роками, сезонами, протягом доби, а також інші періодичні процеси, можна описати за допомогою тригонометричних функцій виду  $y = A\sin(bx + c) + D$ .

Найефективнішим засобом пізнання законів і закономірностей навколишнього світу є моделювання. До моделювання фізичних, екологічних, хімічних, біологічних процесів застосовується не лише елементарна математика, й інші математичні методи: диференціальне та інтегральне числення, диференціальні рівняння, матриці, векторне числення, метод найменших квадратів, статистичні методи та багато інших.

Одним із найефективніших методів побудови математичних моделей, що описують динаміку фізичних, хімічних, екологічних, біологічних, технологічних систем як між окремими їх елементами, так і зовнішніми факторами середовища, в якому перебувають ці елементи, є використання методів теорії диференціальних та інтегральних рівнянь. Класичними задачами такого типу є, наприклад, задачі про охолодження тіла, радіоактивний розпад, поперечні коливання натягнутої струни, швидкість розмноження бактерій, збільшення кількості ферменту, концентрацію розчину, швидкість хімічної реакції, динаміку чисельності популяції, теорію епідемій, ріст дерева та листя на ньому та багато інших [9, с. 20].

Наприклад, модель співіснування типу «хижак - жертва» за чисельністю хижака можна задати системою двох диференціальних рівнянь з двома невідомими  $x(t)$  і  $z(t)$ :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \epsilon x - \beta xz, \\ \frac{dz}{dt} = \gamma xz - \delta x, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\beta$  - деякий коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт внутривидової конкуренції);  $\gamma$  - коефіцієнт народжуваності;  $\delta$  - коефіцієнт смертності;  $\epsilon$  - коефіцієнт, що характеризує перевищення народжуваності над смертністю, який цілком визначається специфікою даної популяції;  $x(t)$  - чисельність популяції (жертва);  $z(t)$  - чисельність хижаків у момент часу  $t$ .

Із системи видно, що  $x(t)$  і  $z(t)$  взаємопов'язані, залежать одне від одного, а саме: якщо збільшується  $z$ , то, бачимо за першим рівнянням, що зменшується похідна  $\frac{dx}{dt}$ . При великих  $z$  ця похідна може стати навіть від'ємною, тобто чисельність  $x(t)$  зменшується. І якщо ця чисельність мала, то в силу другого рівняння системи (1), буде малою (можливо, і від'ємною) похідна  $\frac{dz}{dt}$ , що показує зменшення чисельності  $z(t)$ .

Цю залежність між  $x$  і  $z$  можна проілюструвати на графіку, що являє собою деяку замкнену криву, всередині якої міститься точка  $N(\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\epsilon}{\beta})$ .

Отже, з якої б початкової чисельності ми не почали (наприклад, значень  $x_0$  та  $z_0$  - їм відповідає точка  $A(x_0, z_0)$ ), протягом певного часу величини  $x(t)$  і  $z(t)$  будуть змінюватися так, що точка  $M(x(t); z(t))$  буде рухатися по замкненій кривій, доки знову не співпаде з початковою точкою  $A(x_0, z_0)$ .

Але часто в моделюванні різноманітних процесів доцільніше скористатися мовою лінійної алгебри, зокрема теорією матриць. Матриці оточують нас повсюди, це - фінансово-економічні, статистичні матриці-таблиці, спортивні (турнірні) таблиці, матричні теорії у фізиці, астрономії, біології і

т. ін. Наприклад, в економіці за допомогою матриці можна зобразити ціни за одиницю продукції у різних валютах (2):

$$\begin{array}{l} \text{м'ясо (1кг)} \\ \text{ноутбук (1 шт.)} \\ \text{автомобіль (1шт.)} \end{array} \begin{pmatrix} \text{₴} & \$ & \text{€} \\ 100 & 3,5 & 3,2 \\ 8000 & 290 & 250 \\ 560000 & 20000 & 17550 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Можна розрахувати норми витрат вихідної сировини на випуск кінцевої продукції. Так, нехай на одиницю випуску трьох видів продукції  $A_1, A_2, A_3$  витрачаються комплектуючі двох видів  $B_1, B_2$  відповідно у кількостях (3):

$$\begin{array}{l} A_1 \quad A_2 \quad A_3 \\ B_1 \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \\ B_2 \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \quad (3)$$

У свою чергу на виготовлення одиниці виробів  $B_1, B_2$  витрачається сировина видів  $C_1, C_2, C_3$  (4):

$$\begin{array}{l} B_1 \quad B_2 \\ C_1 \begin{pmatrix} 2 & 1 \end{pmatrix} \\ C_2 \begin{pmatrix} 3 & 2 \end{pmatrix} \\ C_3 \begin{pmatrix} 4 & 3 \end{pmatrix} \end{array} \quad (4)$$

Відомі витрати  $D_1, D_2, D_3$  на одиницю  $C_1, C_2, C_3$  (5):

$$\begin{array}{l} C_1 \quad C_2 \quad C_3 \\ D_1 \begin{pmatrix} 3 & 5 & 7 \end{pmatrix} \\ D_2 \begin{pmatrix} 4 & 1 & 2 \end{pmatrix} \\ D_3 \begin{pmatrix} 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \quad (5)$$

Тоді матриця витрат  $P$  вихідних елементів  $D_1, D_2, D_3$  на одиницю кінцевої продукції  $A_1, A_2, A_3$  можна подати як добуток матриць (5), (4), (3):

$$P = \begin{pmatrix} 3 & 5 & 7 \\ 4 & 1 & 2 \\ 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 2 \\ 4 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 49 & 34 \\ 19 & 12 \\ 28 & 17 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 117 & 200 & 181 \\ 43 & 74 & 69 \\ 62 & 107 & 101 \end{pmatrix}.$$

За допомогою матриць, які називають технологічними, можна чисельно описувати виробничі процеси. Наприклад, знаючи кількість продукції, яку потрібно виготовити, і витрати часу на відповідних верстатах на одиницю продукції, можна обчислити завантаженість обладнання. Апарат лінійної алгебри застосовується для аналізу балансових моделей (модель Леонтьєва) [11, с. 53-63]. У деяких задачах, зокрема пов'язаних з транспортними перевезеннями, закріпленням виробників за споживачами, працівників за верстатами тощо, матриці мають специфічний вигляд: їх елементами є лише 0 і 1 або -1, 0, 1 [11, с. 238-246]. Це дає змогу зменшити громіздкість обчислень за рахунок застосування ІКТ.

Сьогодні в економічній, природничій та інших науках на провідні позиції виходить математична модель як дієвий інструмент дослідження та прогнозування розвитку відповідних процесів і явищ. У системі економічної освіти значна роль відведена курсам економіко-математичного моделювання, дослідженню операцій, оптимізаційним методам з циклу економіко-математичної та загальноекономічної бакалаврської підготовки фахівців за напрямками з економіки і підприємництва, обліку і аудиту, менеджменту. Розв'язування задач планування господарства, підвищення ефективності виробництва, економії ресурсів, покращення методів економічних розрахунків та їх обґрунтування, оптимізації, внутрішнього зв'язку прогнозів, вибору найефективніших інвестиційних рішень і т. п. дають можливість вивчати закономірності ринкової економіки, розробляти нові методи економічних розрахунків і аналізу, методів планування. Значну роль тут відіграє використання сучасних інформаційних технологій.

Економіко-математичне моделювання за останні десятиліття сформувалося в окрему міждисциплінарну область знань із властивими їй об'єктами, підходами та методами дослідження. Економіко-математичне моделювання полягає у заміні реального економічного об'єкта або процесу математичною конструкцією, яка відтворює основні, найістотніші (із позиції дослідника) риси

досліджуваного явища або процесу, абстрагуючись від неістотних. Економіко-математичне моделювання, очевидно, поєднує теорію трьох дисциплін – економіки, математики та інформатики. Тому надзвичайно актуальним постає завдання підготовки спеціалістів-аналітиків. Кваліфікований аналітик, який використовує методи математичного моделювання у повсякденній практиці, певною мірою повинен бути: по-перше, економістом – щоб використовувати економічну теорію для аналізу емпіричних даних; по-друге, математиком – щоб формувати економічну теорію засобами математичної мови, зробивши її придатною для побудови формалізованих схем та перевірки їх коректності (адекватності емпіричним даним); по-третє, спеціалістом у економічній статистиці – щоб володіти процесами формування інформаційної бази даних і вміти порівнювати у відповідності до економічної теорії реально вимірні макро- та мікроекономічні емпіричні показники; по-четверте, спеціалістом у математичній статистиці – щоб використовувати для аналізу емпіричних даних кількісні методи; по-п'яте, спеціалістом із сучасних ІТ технологій – щоб використовувати комп'ютерну техніку та необхідні програмні продукти, без застосування яких сьогодні немислимий системний аналіз, тому що сам процес моделювання здійснюється за допомогою різноманітних спеціалізованих комп'ютерних програм.

За допомогою математичних методів і методів математичного та імітаційного моделювання можна дослідити взаємодію різноманітних факторів при вивченні впливу рушійних сил і механізмів на стан і розвиток різноманітних природних систем, зокрема, при вивченні функціонування біологічних чи екологічних систем як результату взаємодії її складових елементів та зовнішніх чинників, що позначаються на стані середовища, в якому розглядаються ці системи. Тому сучасним студентам – біологам, хімікам, екологам, технологам - необхідно засвоїти хоча б основи вищої математики, методів математичного моделювання, а також набути практичних навичок дослідження цих моделей. І хоч при вивченні досить простих залежностей можуть виникнути складні математичні моделі, можна вибрати досить ефективну в практичному відношенні модель, яка після її верифікації дозволить розв'язати ряд важливих прикладних задач природознавства. Технічною основою таких досліджень має стати застосування ІТ-технологій.

Ми живемо в час бурхливого розвитку інноваційних технологій. Стрімке зростання ролі ІТ-галузі, робототехніки, нанотехнологій виявляє потребу у досвідчених фахівцях. А тому виникає гостра освітня необхідність у якісному навчанні сьогодишніх учнів і вчителів технічним дисциплінам – математиці, фізиці, інженерії, програмуванню. Одним з актуальних напрямів модернізації та інноваційного розвитку природничо-математичного, гуманітарного профілів освіти виступає STEM-орієнтований підхід до навчання, який сприяє популяризації інженерно-технологічних професій серед молоді, підвищенню поінформованості про можливості їх кар'єри в інженерно-технічній сфері, формуванню стійкої мотивації у вивченні дисциплін, на яких ґрунтується STEM-освіта. Особливого значення набуває формування компетентностей особистості, її здатності до творчого, креативного мислення, вміння ефективно вирішувати складні проблеми власної життєдіяльності, що визначає конкурентоспроможність особистості у сучасних економічних умовах. Тому вкрай важливим є забезпечення розвитку напрямів STEM-освіти в закладах освіти. Успішному розвитку STEM-освіти сприяє залучення ресурсів та співробітництво між педагогічними колективами і зовнішніми учасниками: закладами вищої освіти, академічними науковими установами, науково-дослідними лабораторіями, науковими музеями, природничими центрами, підприємствами, бізнес-структурами, громадськими організаціями [10].

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Ми провели дослідження деяких основних понять курсу вищої математики і показали, що математичні твердження в навчальному процесі є ефективними носіями міжпредметних зв'язків основних математичних дисциплін, а також основою створення математичних моделей у прикладних науках. Це сприяє поглибленню професійної підготовки майбутніх магістрів, вчителів математики, а також учителів та науковців інших (природничих, екологічних, економічних) спеціальностей. У перспективі подальших досліджень у цій сфері можуть бути трансформації навчальних курсів математичних, природничих, економічних дисциплін. Впровадження підходів STEM-освіти в загальноосвітні навчальні заклади вимагає системної просвітницької діяльності серед учителів, розробки готових методик проведення занять, сценаріїв заходів. Внесення змін до навчальних програм на сьогодні є недоцільним у першу чергу через відсутність достатньої кількості учителів, здатних впроваджувати ці підходи. Особлива увага приділяється співробітництву фахівців різного профілю у розробленні спеціального освітнього середовища з використанням ІКТ.

#### Список використаної літератури

1. Александров А.Д. Основания геометрии. М.: Наука, 1987. 388 с.
2. Вивальнюк Л.М., Григоренко В.К., Левіщенко С.С. Числові системи. К.: Вища школа, 1988. 271 с.
3. Давидов М.О. Курс математичного аналізу: підручник. У 3-х ч. К.: Вища школа, 1976. Ч. 2. 592 с.
4. Каган В. Ф. Очерки по геометрии. М.: Изд-во Московского ун-та, 1963. 572 с.

5. Костарчук В.М., Хацет Б.І. Курс вищої алгебри: підручник. К.: Вища школа, 1969. 540 с.
6. Колмогоров А.М., Фомін С.В. Елементи теорії функцій і функціонального аналізу: підручник. К.: Вища школа, 1974. 456 с.
7. Кузьмич В.І. Побудова плоских образів у довільному метричному просторі. Вісник Черкаського універ-ту. Серія Педагогічні науки., 2017. №11. С. 40-46.
8. Кузьмич В.І., Валько М.І., Валько П.М., Яковенко Т.О. Про спільну точку операторів. Прикладні питання математичного моделювання, 2018. № 1. Херсон: Херсонський національний технічний університет. С. 19-26.
9. Кушнір Н.О., Валько Н.В., Осипова Н.В., Кузьмич Л.В. Відкриті освітні ресурси для організації навчання у контексті STEM-освіти. ISSN: 2414-0325. Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету, 2017. № 3. С. 247-255.
10. Методичні рекомендації щодо впровадження STEM-освіти у загальноосвітніх та позашкільних навчальних закладах України на 2017/2018 навчальний рік; лист ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти» від 19.07.2018, №22.1/10 - 2573.
11. Савченко О.Г., Валько Н.В., Кузьмич Л.В., Кавун Г.М. Оптимізаційні методи і моделі: інтерактивний комплекс забезпечення дисципліни. Херсон: Айлант, 2014. 430 с.
12. Холл М. Теория групп. М: Изд. иностр. лит., 1962. 468 с.

#### References

1. Aleksandrov A.D. (1987). Osnovaniya geometriyy. M.: Nauka, 388. (in Russ.)
2. Vyvalniuk L.M., Hryhorenko V.K., Levishchenko S.S. Chyslovi systemy.. (1988). K.: Vyshha shkola, 271 (in Ukr.).
3. Davydov M.O. Kurs matematychnogo analizu: pidruchnyk. U 3-x ch. K.: Vyshha shkola, ch. .2, 592 (in Ukr.).
4. Kahan V. F. (1963) Ocherky po heometriyy. M.: Yzd-vo Moskovskoho un-ta, 572. (in Russ.)
5. Kostarchuk V.M., Khatset B.I. (1969). Kurs vyshchoi alhebry: pidruchnyk. K.: Vyshcha shkola., 540. (in Ukr.).
6. Kolmohorov A.M., Fomin S.V. (1974). .Elementy teorii funktsii i funktsionalnoho analizu: pidruchnyk. K.: Vyshcha shkola, 456. (in Ukr.).
7. Kuzmych V.I. (2017). Pobudova ploskykh obraziv u dovilnomu metrychnomu prostori. Visnyk Cherkaskoho univer-tu. Serii Pedahohichni nauky., №11. 40-46. (in Ukr.).
8. Kuzmych V.I., Valko M.I., Valko P.M., Yakovenko T.O. (2018). Pro spilnu tochku operatoriv. Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia., № 1. Kherson: Khersonskiyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. 19-26. (in Ukr.).
9. Kushnir N.O., Valko N.V., Osypova N.V., Kuzmych L.V. (2017). Vidkryti osvitni resursy dlia orhanizatsii navchannia u konteksti STEM-osvity. ISSN: 2414-0325. Vidkryte osvitnie e-seredovyshe sучasnoho universytetu., № 3, 247-255. (in Ukr.).
10. Methodychni rekomendatsii shchodo vprovadzhennia STEM-osvity u zahalnoosvitnikh ta pozashkilnykh navchalnykh zakladakh Ukrainy na 2017/2018 navchalnyi rik; lyst DNU «Instytut modernizatsii zmistu osvity» vid 19.07.2018, № 22.1/10 - 2573.
11. Savchenko O.H., Valko N.V., Kuzmych L.V., Kavun H.M. (2014). Optymizatsiini metody i modeli: interaktyvnyi kompleks zabezpechennia dystsypliny. Kherson: Ailant, 430. (in Ukr.).
12. Khol M. (1962). Teoryia hrupp. M: Yzd. ynostr. lyt., 468. (in Rus.)



UDC 004.832.25

V.V. POLYVODA

Kherson State Maritime Academy

O.V. POLYVODA

Kherson National Technical University

## **AUTOMATED SYSTEM OF ACADEMIC PROCESS MANAGEMENT IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS**

*The article deals with the problem of creating an automated system for planning the educational process in Ukrainian institutions of higher education, taking into account the current requirements for the organization of the educational process, as well as the professional competence of the teacher. The developed automated system with use of the decision support system (DSS) allows preparing academic and working academic plans, calculating the academic load volume and making decisions on its distribution among the teachers of the department. The advantage of the proposed system is the ability to improve the process of planning the academic load, eliminate possible errors caused by the human factor, takes into account the competence of teachers, and stimulates their professional activity.*

*Key words: educational process, academic load distribution, competence, DSS, database.*

В.В. ПОЛИВОДА

Херсонська державна морська академія

О.В. ПОЛИВОДА

Херсонський національний технічний університет

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ НАВЧАЛЬНИМ ПРОЦЕСОМ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*У статті розглянута проблема створення автоматизованої системи планування навчального процесу в українських закладах вищої освіти з урахуванням діючих вимог до організації навчального процесу, а також професійної компетентності викладача. Розроблена автоматизована система з використанням системи підтримки прийняття рішень (СППР) дозволяє виконувати підготовку навчальних і робочих планів, розраховувати обсяг навчального навантаження і приймати рішення щодо його розподілу між викладачами кафедри. Перевагою запропонованої системи є можливість удосконалити процес планування навчального навантаження, усунути можливі помилки, викликані людським фактором, здійснити облік компетентності викладачів, стимулювати їх професійну активність.*

*Ключові слова: навчальний процес, розподіл навчального навантаження, компетентність, СППР, база даних.*

В.В. ПОЛИВОДА

Херсонская государственная морская академия

О.В. ПОЛИВОДА

Херсонский национальный технический университет

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УЧЕБНЫМ ПРОЦЕССОМ В ЗАВЕДЕНИЯХ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

*В статье рассмотрена проблема создания автоматизированной системы планирования учебного процесса в украинских заведениях высшего образования с учетом действующих требований к организации учебного процесса, а также профессиональной компетентности преподавателя. Разработанная автоматизированная система с использованием системы поддержки принятия решений (СППР) позволяет выполнять подготовку учебных и рабочих планов, рассчитывать объем учебной нагрузки и принимать решения по ее распределению между преподавателями кафедры. Достоинством предложенной системы является возможность усовершенствовать процесс планирования учебной нагрузки, исключить возможные ошибки, вызванные человеческим фактором, производить учет компетентности преподавателей, стимулировать их профессиональную активность.*

*Ключевые слова: учебный процесс, распределение учебной нагрузки, компетентность, СППР, база данных.*

### Problem statement

The education system solves important problems of cultural and socio-economic development of society, because any educational institution prepares a person to be active in the political, cultural and economic life of society. Therefore, the main factor in the successful functioning of an educational institution is the competent organization of the educational process. Modern information technologies provide wide opportunities in the organization and management of the educational process. Currently, the automation of the educational process is an integral part of the activities of any educational institution that wants to have the right to be called progressive.

The educational (or learning, or academic) process – a focused interaction of the teacher and students, during which the tasks of education, development and train of students; organization of education in the relationship of all components [1]. The goal of this process in a higher educational institution is to prepare a specialist with the necessary qualifications, which is determined by both the state educational standard and market requirements. To achieve this goal it is necessary, first of all, to study the problem of control the educational process and determine its specificity.

### Analysis of recent research and publications

A standard is a format approved by a competent standardization institution or accepted by industry as a sample de facto. Both equipment and software are standardized, in particular, programs used in e-learning. The most common standards in e-learning are the following:

- IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers LTSC – Learning Technology Standards Committee [2];
- AICC – Airline Industry Computer Based Training Committee [3];
- IMS – Instructional Management Systems [4];
- ADL – Advanced Distributed Learning SCORM – Sharable Content Object Reference Model [5];
- ARIADNE - Alliance of Remote Instructional Authoring & Distribution Networks for Europe [6].

However, these systems automate the learning process, the process of obtaining new knowledge and skills, in electronic form. The planning of the educational process in the classical form, taking into account the specifics of the Ukrainian institutions of higher education, is absent in these systems.

### The aim of the research

The aim of the study is to create an automated system for planning the educational process in Ukrainian institutions of higher education, taking into account the current requirements for the organization of the educational process, as well as the professional competence of the teacher.

### Main part

When planning an educational process, an important task is the preparation of a number of documents that characterize the educational process: curriculum (academic plan), working curriculum, academic load volume per an academic year, academic load distribution among teachers of the department, a consolidated document for the academic load distribution approval. If the first document is prepared by the corresponding existing departments in institutions of higher education, then the preparation of all other documents, as a rule, is transferred to the dean's offices, which assign this work directly to the departments. This increases the amount of work done by the department staff, so it became necessary to automate this process.

In practice, most often the automation of educational planning in Ukrainian institutions of higher education is performed in software packages for automating office tasks, for example, Word or Excel. However, it is worth considering that these packages are not free of charge, and the automation process is reduced to manually filling in tables and entering text, which introduces human factors and possible errors, and the process of optimizing the academic load on the teacher is not automated at all, and some subjective criteria and methods are used.

The problem of developing an automated educational management system at a higher education institution has appeared.

The main task in planning the academic (study) load is the complete distribution of academic load hours among the teachers of the department, which can be formulated as the following objective (goal) function:

$$V = V_0 - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} V_{ij} \rightarrow 0, \quad 1)$$

where  $V$  – the number of undistributed hours;  $V_0$  – total number of hours according to the academic load volume per year;  $V_{ij}$  – the volume in hours of each academic load type  $j$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M_i}$ ;  $N$  – the number of teachers at the department;  $M_i$  – number of academic load types of a particular teacher  $i$ .

When planning an academic load, there are a number of limitations due to the requirements of regulatory documents:

1) the value of the teacher's rate depending on the type of employment must be in the range

$$0 < S_i \leq P_k, \quad 2)$$

where  $S_i$  – the value of the teacher's rate;  $P_k = \{1,5;0,5\}$  – the maximum allowed rate for teachers of different types of employment;  $k = \{1;2\}$  – type of employment of a teacher – permanent employment or part-time, respectively;

2) the calculation of the rate depends on the minimum academic load volume per 1 rate and is calculated as

$$S_i = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^{M_i} V_{ij}}{V_l} & \text{if } \sum_{j=1}^{M_i} V_{ij} \leq V_{\min l}, \\ 1 + \frac{\sum_{j=1}^{M_i} V_{ij} - V_{\min l}}{600} & \text{if } \sum_{j=1}^{M_i} V_{ij} > V_{\min l}, \end{cases} \quad (3)$$

where  $V_{\min l}$  – the academic load minimum volume per 1 rate of scientific and pedagogical staff per year, depending on the occupied position, according to the regulatory documents, in hours;  $l = \overline{1,12}$ . An example of the dependence of the minimum volume of hours of the academic load from the occupied position is given in Table 1.

Table 1. Minimum volume of hours of academic load dependence from the occupied position

| $l$ | Position                                                                           | Minimum hours  |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1   | Professor                                                                          | 450            |
| 2   | Docent                                                                             | 500            |
| 3   | Senior Lecturer                                                                    | 570            |
| 4   | Teacher, assistant                                                                 | 600            |
| 5   | Head of the department, professor                                                  | 400            |
| 6   | Head of the department, associate professor                                        | 450            |
| 7   | Deputy Head of the graduate department (-10% of the academic load of the position) | $0,9 V_{\min}$ |
| 8   | Rector                                                                             | 150            |
| 9   | First pro-rector                                                                   | 150            |
| 10  | Pro-rector                                                                         | 300            |
| 11  | Head of structural divisions and departments                                       | 300            |
| 12  | Part-time employer                                                                 | 600            |

3) Other requirements, for example, allowed number of lecture subjects for a teacher, number of students for the graduation work guidance per a teacher, the ability to teach subjects in a foreign language.

When distributing the academic load it is important to consider the competence of the teacher in satisfying the requirements in accordance with the current licensing conditions for the initiation and conduct of educational activities, which are approved at the state level by the profile ministry. Professional competence is defined as the volume of competences in the field of professional activity. In a narrower sense, professional competence is interpreted as a range of issues in which the person possesses knowledge, experience, the combination of which reflects professional qualification [7]. In the developed automated system for planning an academic load, the competence of a teacher in a specific type of academic load is determined according to an integral criterion consisting of the following 20 accepted indicators: the results of scientific activity in accordance with clauses 1-18 of licensing conditions, the compliance of base education and academic degree

with the type of academic load. To determine the integral criterion for each teacher in all disciplines, a competence matrix  $\mathbf{K}^i$  must be composed in form as

$$\mathbf{K}^i = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1p} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{q1} & k_{q2} & \dots & k_{qp} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

where the elements  $k$  of the matrix  $\mathbf{K}^i$  are equal to 1 or 0, depending on the presence or absence of scientific activity results, as well as compliance or non-compliance of bases education and academic degree with the type of academic load;  $p = 20$  – the number of accepted indicators;  $q$  – the number of types of academic load in the total volume for distribution.

Then the integral criterion for each discipline and each teacher can be written as

$$\mathbf{G}^i = [g_1^i \ g_2^i \ \dots \ g_q^i]^T = \left[ \frac{1}{p} \sum_{r=1}^p k_{1r}, \frac{1}{p} \sum_{r=1}^p k_{2r}, \dots, \frac{1}{p} \sum_{r=1}^p k_{qr} \right]^T. \quad (5)$$

The data obtained as a result of the calculation of the criteria according to (5) are recorded in Table 2.

Table 2. Summary table of integral indicators

|                | Teacher 1 | Teacher 2 | ... | Teacher $i$ | ... | Teacher $N$ |
|----------------|-----------|-----------|-----|-------------|-----|-------------|
| Discipline 1   | $g_1^1$   | $g_1^2$   | ... | $g_1^i$     | ... | $g_1^N$     |
| Discipline 2   | $g_2^1$   | $g_2^2$   | ... | $g_2^i$     | ... | $g_2^N$     |
| ...            | ...       | ...       | ... | ...         | ... | ...         |
| Discipline $q$ | $g_q^1$   | $g_q^2$   | ... | $g_q^i$     | ... | $g_q^N$     |

The distribution of academic load (disciplines, etc.) is made according to the following algorithm:

- 1) For each discipline  $m = 1, \bar{q}$  from table 2, a teacher  $i$  is identified who has the maximum integral indicator  $\max g_m^i$ ; the discipline is distributed in the academic load to the identified teacher.
- 2) If the maximum integral indicator has several teachers, then the discipline is distributed to the teacher to whom it was distributed in the last academic year.
- 3) If it is impossible to make an unequivocal choice in step 2 (for example, the discipline was not distributed to any of the teachers last year, or the discipline is distributed for the first time), then among the teachers identified in step 1, the choice is made by the decision maker (DM) – usually, this is the head of the department.

Based on the proposed method, the structure of the decision support system (DSS) is developed, shown in Fig. 1.

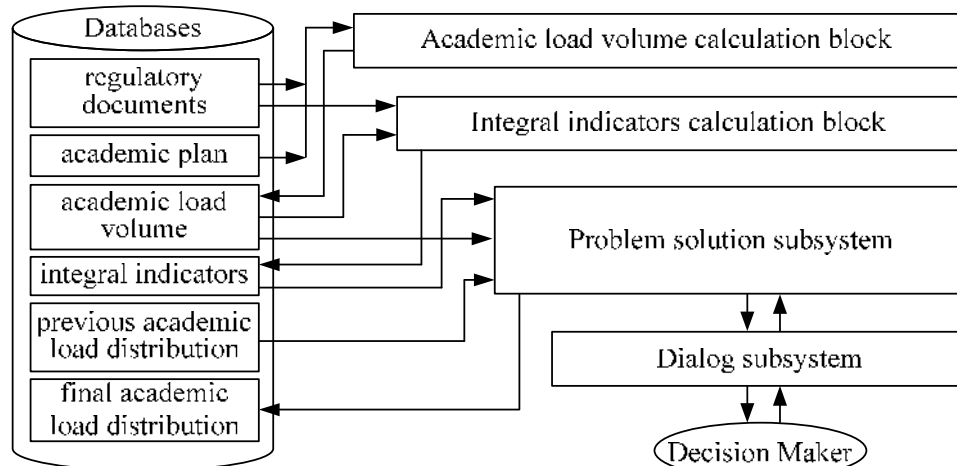


Fig. 1 – DSS structure





Report Preview - raport.frx - Page 1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

РАПОРТ

про затвердження попереднього навчального навантаження

кафедри \_\_\_\_\_

на 2019/2020 навчальний рік

" " \_\_\_\_\_

20\_\_ року

| № з/п             | Прізвище, ім'я та по батькові | Посада викладача | Вчене звання | Науковий ступінь        | Почесне і спортивне звання | Навчальна робота  |        |        |                     |                   |             | Всього годин | Величина ставки | На вий. період, заплановані години і ставка | Разом за навчальний рік |                 |              |                 |
|-------------------|-------------------------------|------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|-------------|--------------|-----------------|---------------------------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|
|                   |                               |                  |              |                         |                            | аудиторні заняття |        |        |                     |                   | Аспірантура |              |                 |                                             | Всього годин            | Величина ставки | Всього годин | Величина ставки |
|                   |                               |                  |              |                         |                            | Усього годин      | усього | Лекції | Лабораторні заняття | Практичні заняття |             |              |                 |                                             |                         |                 |              |                 |
| 1                 | 2                             | 3                | 4            | 5                       | 6                          | 7                 | 8      | 9      | 10                  | 11                | 12          | 13           | 14              | 15                                          | 16                      | 17              |              |                 |
| Штатні працівники |                               |                  |              |                         |                            |                   |        |        |                     |                   |             |              |                 |                                             |                         |                 |              |                 |
| 1                 | Викладач 1                    | професор кафедри | професор     | доктор технічних наук   | —                          | 157.40            | 50     | 20     | 20                  | 10                | 0           | 157.40       | 0.35            | 01.09.2019-31.08.2020                       | 157.40                  | 0.35            |              |                 |
| 2                 | Викладач 2                    | професор кафедри | доцент       | кандидат технічних наук | —                          | 227.07            | 64     | 34     | 30                  | 0                 | 0           | 227.07       | 0.50            | 01.09.2019-31.08.2020                       | 227.07                  | 0.50            |              |                 |
| 3                 | Викладач 3                    | викладач кафедри | —            | —                       | —                          | 862.00            | 862    | 0      | 498                 | 364               | 0           | 600.00       | 1.00            | 01.09.2019-31.08.2020                       | 862.00                  | 1.44            |              |                 |
|                   |                               |                  |              |                         |                            |                   |        |        |                     |                   |             | 252.00       | 0.44            | 01.09.2019-30.06.2020                       |                         |                 |              |                 |

Fig. 5 – Example of the DSS printed documents – consolidated document for the academic load distribution approval

At the end, the user receives all the necessary documents for the planning of academic process in higher education institutions in Ukraine.

### Conclusions

The developed automated system of the educational process management in institutions of higher education using the DSS allows to prepare curriculum and working curriculum, calculate the academic load volume and to make decisions on its distribution among teachers of the department. The advantage of the proposed system is that it is implemented on free software, as well as greatly eases the process of planning the academic load, eliminates possible errors caused by the human factor, provides the opportunity to take into account the competence of teachers, stimulates them for professional activity. This system can be supplemented by modules for solving other tasks, such as drawing up a schedule, taking into account the load of the auditorium fund, personnel accounting of teachers, etc.

### References

1. Коджаспирова Г.М. Педагогика: учебник для академического бакалавриата. Москва: Издательство Юрайт, 2015. 719 с.
2. IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers LTSC – Learning Technology Standards Committee. URL: <http://ltsc.ieee.org>.
3. AICC – Airline Industry Computer Based Training Committee. URL: <http://www.aicc.org>.
4. IMS – Instructional Management Systems. URL: <http://www.imsproject.org>.
5. ADL – Advanced Distributed Learning SCORM – Sharable Content Object Reference Model. URL: <http://www.adlnet.org>.
6. ARIADNE - Alliance of Remote Instructional Authoring & Distribution Networks for Europe. URL: <http://www.ariadne-eu.org>.
7. Молчанов С.Г. Профессиональная компетентность и система повышения квалификации педагогических и управленческих работников. Вестник Челябинского университета: научный журнал. Серия 5. Педагогика. Психология. Челябинск: ЧелГУ, 2011. № 1. С. 84-99.

### References

1. Kodzhaspirova G.M. Pedagogika: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata. Moscow: Yurayt Publ., 2015. 719 pp.
2. IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers LTSC – Learning Technology Standards Committee. URL: <http://ltsc.ieee.org>.
3. AICC – Airline Industry Computer Based Training Committee. URL: <http://www.aicc.org>.
4. IMS – Instructional Management Systems. URL: <http://www.imsproject.org>.
5. ADL – Advanced Distributed Learning SCORM – Sharable Content Object Reference Model. URL: <http://www.adlnet.org>.
6. ARIADNE - Alliance of Remote Instructional Authoring & Distribution Networks for Europe. URL: <http://www.ariadne-eu.org>.
7. Molchanov S.G. Professionalnaya kompetentnost i sistema povysheniya kvalifikatsii pedagogicheskikh i upravlencheskikh rabotnikov. "Vestnik Chelyabinskogo universiteta" journal. Series 5. Pedagogy. Psychology. Chelyabinsk: ChelGU, 2011. No 1. p. 84-99.

УДК: 378:37.011.3-051:004

М.О. ЦАРЕНКО, Г.М. ТОЛПЕКІНА, О.В. ПОНОМАРЕНКО  
Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д.Ушинського

### АДАПТИВНИЙ ПІДХІД ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО КЛАСУ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

*Робота присвячена розробці методики навчання учнів як у класних приміщеннях, так і поза її межами і навіть за кордоном. Метою роботи являється розробка методики використання технології віртуального класу вчителем в організації індивідуального навчання учнів. Пропонується адаптивний підхід до форми занять, що синтезує сучасні ІКТ, переваги поурочного навчання, відрізняється високою мотивацією пізнавальної діяльності учнів та надає своєчасну і дієву допомогу кожному, хто її потребує. Значну перевагу у навчанні дає використання технологій віртуального класу, що передбачає інтерактивну взаємодію вчителів та учнів у реальному часі засобами Інтернет-технологій. З метою удосконалення індивідуальної форми навчання адаптовано сервіс WiZiQ і застосовано технології віртуального класу до організації навчально-виховного процесу. Розроблено критерії визначення рівня активізації пізнавальної діяльності учнів та підвищення рівня ІКТ-компетентності вчителів.*

*Ключові слова: інформаційно-комунікативні компетентності, адаптивний підхід, технології віртуального класу, індивідуальне навчання, вчителі-предметники.*

Н.А. ЦАРЕНКО, Г.М.. ТОЛПЕКИНА, Е.В. ПОНОМАРЕНКО  
Южноукраинский национальный педагогический университет имени К. Д. Ушинского

### АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД ВИРТУАЛЬНОГО УЧЕБНОГО КЛАССА В ИНФОРМАЦИОННО-КОМУНІКАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Работа посвящена разработке методики обучения учащихся как в классных помещениях, так и за их пределами и даже за рубежом. Целью работы является разработка методики использования технологии виртуального класса учителем в организации индивидуального обучения учащихся. Предлагается адаптивный подход к форме занятий, синтезирует современные ИКТ, преимущества поурочного обучения, отличается высокой мотивацией познавательной деятельности учащихся и предоставляет своевременную и действенную помощь каждому, кто в ней нуждается. Значительное преимущество в обучении дает использование технологий виртуального класса, предполагает интерактивное взаимодействие учителей и учащихся в реальном времени средствами Интернет-технологий. С целью усовершенствования индивидуальной формы обучения адаптировано сервис WiZiQ и применены технологии виртуального класса к организации учебно-воспитательного процесса. Разработаны критерии определения уровня активизации познавательной деятельности учащихся и уровня ИКТ-компетентности учителей.*

*Ключевые слова: информационно-коммуникативные компетентности, адаптивный подход, технологии виртуального класса, индивидуальное обучение, учителя-предметники.*

M.O. TSARENKO, G.M.TOLPEKINA, O.V. PONOMARENKO  
South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushynsky

### ADAPTIVE APPROACH OF THE VIRTUAL EDUCATIONAL CLASS IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

*The work is devoted to the development of methods for teaching students both in classrooms and remotely, even from abroad. The purpose of the work is to develop a methodology for using virtual classroom technology by a teacher in organizing individual student learning process. An adaptive approach is proposed to the structure of lessons, which synthesizes modern ICTs, the benefits of per lesson learning, differs with highly motivated pupils' cognitive activity, and provides timely and effective assistance to everyone in need.*

*The use of virtual classroom technologies offers a significant advantage for the learning process and facilitates interaction between teachers and students in real time by means of Internet technologies. In order to improve the individual form of training the WiZiQ service is adapted and virtual class technology is applied to the organization of the educational process. The criteria for determining the level of pupils' cognitive activity and for*

*raising the level of ICT competence of the teachers are developed. Technologies of the virtual class in the system of exercises and creative tasks activate the cognitive activity of the student, which is confirmed by a pedagogical experiment. It is established that training can be carried out regardless of where the student is located. It is sufficient to have a laptop and access to the Internet. It is shown that as a result of the use of virtual class technologies, subject teachers can independently plan lessons, send invitations, develop presentations and download them for demonstration, use a graphic tablet, select video and audio files. The integral effect of the use of virtual classroom technologies is based on the provisions: a student who can not attend the school, integrates into a class and becomes an active participant, during quarantines provides a continuous educational process; children who are undergoing long-term care can actively work with their class without leaving their homes or hospitals; the real legalization of the training of young Ukrainians who are accompanying their parents abroad. Further research can be done in the following areas: virtual classroom technology in dealing with gifted students, virtual classroom technology for working in educational projects, virtual classroom technology to enhance pupils' cognitive activity while learning foreign languages.*

*Keywords: information and communication competencies, adaptive approach, virtual class technologies, individual training, subject teachers.*

### Постановка проблеми

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що підключення загальноосвітніх навчальних закладів (ЗНЗ) до мережі Інтернет, забезпечення їх сучасними комп'ютерами, проекторами, інтерактивними дошками, мультимедійними комплексами зумовили появу низки проблем, що пов'язані з необхідністю модернізації та використання новітніх технологій навчання дітей, які знаходяться на довготривалому лікуванні, та підвищенням кваліфікації педагогічних кадрів у сфері використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Виникла потреба в такій формі занять, що синтезувала б сучасні ІКТ, переваги поурочного навчання, відрізнялася б високою мотивацією пізнавальної діяльності учнів та надавала своєчасну і дієву допомогу кожному, хто її потребує.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основні положення законів України «Про освіту», «Про загальну середню освіту», «Про Національну програму інформатизації», державних програм «Освіта. Україна XXI століття», «Вчитель», Національної доктрини розвитку освіти в Україні у XXI столітті, державної цільової програми впровадження в навчально-виховний процес загальноосвітніх навчальних закладів інформаційно-комунікаційних технологій орієнтуються на створення системи дистанційного навчання для дітей, які перебувають на довготривалому лікуванні, та на використання ІКТ вчителями з метою оновлення форм і методів навчання учнів і підвищення ефективності навчально-виховного процесу у загальноосвітніх навчальних закладах. Більшість вказаних проблем можна ліквідувати за допомогою використання технологій віртуального класу, що передбачають інтерактивну взаємодію вчителя і учня в реальному часі засобами Інтернет-технологій. Вони є новим явищем у практиці загальноосвітніх навчальних закладів, але дослідження вітчизняних (Биков В.Ю. [1], Жабєєв Г.В. [2], Морзе Н.В. [3] та ін.), і зарубіжних вчених (Бірін Д. [4], Літлфілд Д. [5]) вказують на перспективність їх використання. Саме для дітей, які навчаються індивідуально і не відвідують школу, технології віртуального класу збагачують педагогічний навчально-виховний процес можливістю організації роботи в парах, малих групах, дають можливість спілкування з висококваліфікованими педагогами з інших шкіл, змогу отримати миттєву відповідь на актуальні запитання в режимі реального часу. Розвиток науково-методичної бази ЗНЗ з питання дослідження достатньо розкрито в таких аспектах: використання інформаційно-комунікаційних технологій у навчальному процесі (Биков В.Ю. [1], Жалдак М.І. [2], Морзе Н.В. [6], та ін.), положення теорії дистанційного навчання (Васильченко Л.В. [7], Жабєєв Г.В. [2], Морзе Н.В. [6] та ін.); основи формування віртуальної реальності, основи формування комп'ютерно орієнтованого навчального середовища (Биков В.Ю. [1], Триус Ю.В. [8]); основи інформатизації і комп'ютеризації навчально-виховного процесу (Биков В.Ю. [1], Жалдак М.І. [9] та ін.), формування інформаційно-комунікаційної компетентності (Овчарук О.В. [1], та ін.).

### Мета дослідження

Розробити методику використання технології віртуального класу вчителем в організації індивідуального навчання учнів. Сприяти активізації пізнавальної діяльності учнів, розвитку здібностей і творчого потенціалу особистості учня, формуванню важливих елементів інформаційної, проектної і екранної культури, удосконалити організаційні форми індивідуального навчання учнів та підвищити рівень ІКТ компетентності вчителів. Для досягнення мети і перевірки гіпотези дослідження було сформульовано завдання дослідження:

Проаналізувати науково-теоретичні основи розвитку технологій віртуального класу в комп'ютерно орієнтованому навчальному середовищі закладу освіти в Україні та за рубежом; 2) обґрунтувати та

розробити модель і методику організації індивідуального навчання учнів з використанням технологій віртуального класу;3) експериментально перевірити ефективність методики організації індивідуального навчання учнів з використанням авторської моделі та впровадити її у навчально-виховний процес ЗНЗ.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Методологічною основою дослідження є положення теорії пізнання, яка використовувалася для аналізу, систематизації, узагальнення теоретичних положень комп'ютерно орієнтованого навчального середовища, теорії розвитку інформаційного суспільства та особистості в процесі навчання і виховання. Для досягнення поставленої мети, використано такі методи дослідження. *Теоретичні методи* — аналіз монографій, дисертаційних досліджень, статей, матеріалів науково - практичних конференцій, психолого-педагогічної, методичної, спеціальної літератури з проблеми дослідження, проблем використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. *Емпіричні методи* — педагогічне анкетування, опитування, бесіди з учителями, учнями, пряме, побічне спостереження за процесом використання технологій віртуального класу, визначення рівня ІКТ-компетентності вчителів предметників, статистичне опрацювання результатів педагогічного експерименту та їх аналіз.

*Технології віртуального класу* — це підмножина педагогічних технологій навчання, які реалізуються засобами ІКТ і використовуються у віртуальному класі. ТВК можна поділити на дві групи. Одна — підмножина педагогічних технологій навчання; друга — засоби взаємодії. До *першої групи* відносяться: традиційне навчання, інтерактивний підхід, розвивальне навчання, проблемне навчання, активне навчання, метод проєктів, ігрові технології тощо. До *другої групи* відносяться технології, які забезпечують досягнення навчально-виховної мети уроку і поділяються на чотири основні групи: технології колаборації, доставки, оптимізації та керування, демонстрації. Педагогічна спільнота психологічно підготовлена до необхідності змінюватися і змінювати своє навчальне середовище, зокрема протягом останніх десятиліть у багатьох країнах світу та в Україні змінилася суспільна парадигма — від технократичної до індустріальної, від індустріальної до інформаційної [119]. Поняття «компетентність» введено у науковий обіг понад чверть століття. Під «компетентністю» педагоги розуміють спеціальні структуровані системи знань, умінь, навичок і ставлень, що їх набувають у процесі навчання.

*Методика використання технологій віртуального класу в організації індивідуального навчання учнів.*

Використання технологій віртуального класу базується на безпосередній інтерактивній взаємодії вчителя і учня та спрямоване на поліпшення організації індивідуального навчання. Цю взаємодію забезпечують такі технології: демонстрації, колаборації, доставки, оптимізації та керування. Технології колаборації — це технології взаємодії вчителя з учнем. Для вчителя важливо, яким чином здійснити взаємодію, якщо у нього й учня в розпорядженні тільки комп'ютер. Технології віртуального класу надають таку можливість, залучаючи аудіальні, візуальні, кінестетичні канали сприйняття інформації.

«Класна дошка» — аналог інтерактивної дошки, використовується для пояснення навчального матеріалу.

«Олівець» — аналог ручки або олівця, що забезпечує створення записів, малюнків. Допускаються різні кольори і різна товщина ліній.

«Відеокамера» забезпечує передачу зображення учасників навчального процесу. Під час такої взаємодії вчитель і учень забувають, що вони знаходяться на відстані один від одного, що створює атмосферу присутності на уроці.

«Чат» забезпечує обмін текстовими повідомленнями в режимі online. Технологія дає можливість під час пояснення матеріалу в режимі online отримувати від учня запитання, прохання зупинитися на незрозумілих формулах, повторити правило, за необхідності передивитись попередні слайди презентації.

«Інтерактивне опитування» — технологія нахшталт «екзитпулу». Учителем створюється запитання, на яке учень має відібрати одну правильну відповідь.

«Веб-подорож» забезпечує демонстрацію робочого столу комп'ютера вчителя і подорож по навчальних або пізнавальних веб-сайтах. Унікальна можливість мандрувати разом зі вчителем або однолітками по відомих світових музеях, бібліотеках, містах.

**Технології демонстрацій.** До них відносяться презентації, документи, таблиці, Flash-анімація, відео та аудіофайли. *Презентації.* При використанні технологій демонстрації на екран завантажуються різноманітні матеріали. Найпопулярнішими у вчителів є презентації. Доцільно враховувати фактори, які визначають організацію зорового поля при демонстрації презентацій

*Слайд-шоу.* Повна відсутність тексту і акцент на яскраві, великі зображення. Демонструється з метою створення певного емоційного настрою або для надання більш повного уявлення про подію чи процес.



Демонстрація слайд-шоу впродовж всього уроку представляється малоефективною використовується на початку або в кінці уроку. Позитивний ефект досягається на уроках історії, літератури, географії.

**Аудіофайли.** До них віднесено звукові фрагменти та музичні твори. Звукові фрагменти грають роль звукового супроводу, ілюстрації або шумового ефекту. Шумовий ефект повинен бути дидактично виправданий. Наприклад, після закінчення навчання з використанням технологій віртуального класу шумовий ефект може стати сигналом кінця уроку.

**Використання Flash-анімації.** Там, де в навчанні замало нерухомих ілюстрацій, таблиць, схем, може допомогти рухоме зображення — анімація. Flash-анімація може значно активізувати навчальний ефект представленням результатів різних процесів у реальному часі. Зразком ефективного використання Flash-анімації для підсилення наочності навчального матеріалу є мультимедійний посібник «Інтерактивні плакати з фізики».

**Технології доставки .YouTube** (ю-тюб) — це сервіс, який надає послугу хосту відеоматеріалів (відеофрагментів). Вчитель-предметник може скористатися хостом для зберігання власних відеоматеріалів з подальшим використанням для навчання учнів.

**Scribd** — це Інтернет-сервіс для розміщення документів. Більшість учителів користується ним як сервісом для перегляду та публікації безкоштовних PDF-документів. Термін зберігання документів складає два місяці, потім вони переносяться до архіву. Позитивний ефект досягається доступом до документу незалежно від місця знаходження як вчителя, так і учня.

**Slideshare** — це сервіс, який надає послугу хосту для розміщення презентацій. Учителі можуть додавати, переглядати та коментувати презентації. Для завантаження на сервіс WiZiQ достатньо знати URL-адресу цього файлу.

**Технології оптимізації та керування .** Ці технології спрямовані на оптимізацію роботи за комп'ютером і наближення організації навчального процесу до класно-урочного (звичного для учня).

**Відеокамера** під час проведення уроку може бути увімкнена або вимкнена. Вчитель сам керує навчальним процесом і вирішує, в який момент забезпечити візуальний контакт з учнем, або підтримує його постійно.

**Мікрофон** — необхідна технологія голосового спілкування.

**«Підняти руку».** Ця електронна технологія — аналог дитячої руки, яку піднімають учні під час уроку для надання відповіді або при виникненні запитання.

**Експериментальна перевірка ефективності технологій віртуального класу.** Інформаційно-комунікаційна компетентність передбачає здатність вчителя-предметника використовувати ІКТ у своїй професійній діяльності. Інформаційно-комунікаційна компетентність у свою чергу, поділяється на три основні, що відповідають окремим видам діяльності вчителів-предметників: загальна; діагностична; предметно-орієнтована [151]. Загальна компетентність — це здатність вчителя-предметника використовувати ІКТ для забезпечення успішності навчально-виховного процесу, створюючи текстові документи, таблиці, малюнки, діаграми, презентації, комп'ютерні графічні об'єкти, Flash-анімацію. Тому все більшої важливості набуває предметно-орієнтована компетентність — здатність вчителя-предметника доцільно використовувати і поєднувати готові електронні продукти у своїй професійній діяльності. Міжнародне суспільство застосування технологій в освіті (National Educational Technology Standart, NETS\*T), формулює ключові ІКТ компетентності вчителя, за якими діяльність вчителів-предметників повинна сприяти навчанню і креативності учнів, стимулювати їх, проєктувати, розвивати цифровий досвід навчання, оцінювання, моделювати цифрову працю, навчання, сприяти та моделювати цифрове суспільство, відповідальність, забезпечувати професійний розвиток і лідерство. Підхід NETS\*T ([www.iste.org](http://www.iste.org)) дає можливість наскрізно відобразити складові ІКТ-компетентності у процесі їх набуття на всіх рівнях удосконалення [11]. Технології віртуального класу дають змогу вирішити одне з найважливіших завдань освіти — інтеграція учнів, які знаходяться вдома і не можуть відвідувати школу, у клас і залучення їх до інтерактивної взаємодії під час проведення виховних заходів, класних годин і звичайних уроків. У ході апробації було розкрито додаткові можливості використання технологій віртуального класу — інтерактивної роботи з обдарованими учнями, надання їм консультації, роботи у міжнародних проєктах (мовних, екологічних, енергозберігаючих), проведення консультацій при підготовці до захисту робіт МАН. Цікавою знахідкою було проведення бінарних уроків (хімія-фізика, природа-англійська мова).

Самостійне проведення уроків у віртуальному класі зараховується як залікова робота. Круглі столи дають можливість виявити проблемні моменти у підготовці учнів і вчителів. Враховуючи цю особливість дослідження, було проведено *масовий послідовний експеримент* (за Гончаренком С.У.). На цій особливості дослідно-експериментальної роботи наголошував учений Фокєєв М.І. [12], адже уявлення про віртуальний клас, які мали вчителі до дослідження не відповідали дійсності. Дослідження спрямували на вивчення ІКТ



компетентності вчителя до використання технологій віртуального класу і після нього і задіяли 75 вчителів. Компетентність вчителя відображається у його здатності використовувати новітні ІКТ у своїй професійній діяльності. Отримані дані є результатами вимірювання педагогічних явищ — рівня ІКТ-компетентності вчителів-предметників. Під вимірюванням розуміємо процедуру приписування чисел об'єктам навчально-виховного процесу. Відповідність числових характеристик реальним величинам становить першу важливу умову коректності кількісного дослідження. Ми упорядкували об'єкти за порівнюваною величиною «високий рівень», «середній рівень», «низький рівень» ІКТ-компетентності. Опанування навичками роботи на комп'ютері було повністю покладено на особистість вчителя, тому й рівень підготовки у кожного різний — все залежало від доступу до комп'ютерної техніки, наявності Інтернету, власних можливостей, сил і бажання.

Перший рівень — «Маєте уявлення про ІКТ». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 17% до 33%, на середньому з 62% до 67%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 21% до 0%. Основні показники ІКТ компетентності першого рівня збільшилися.

Другий рівень — «Мінімальні базові знання з ІКТ». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 18% до 24%, на середньому з 48% до 76%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 34% до 0%. Основні показники ІКТ компетентності другого рівня збільшилися. Значно змінилися показники середнього рівня. Це дає підстави констатувати стійкі навички у використанні комп'ютерних технологій і позитивний вплив використання технологій віртуального класу для активізації пізнавальної діяльності учнів.

Третій рівень — «Базові знання з ІКТ». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 7% до 18%, на середньому з 39% до 59%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 54% до 23%. Основні показники ІКТ-компетентності третього рівня змінилися. Отже, гіпотеза підтвердилася — вчителі-предметники підвищили свій рівень ІКТ-компетентності після експерименту більше, ніж до початку експерименту.

Четвертий рівень — «Поглиблений рівень». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 2% до 7%, на середньому з 36% до 64%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 62% до 29%. Основні показники ІКТ компетентності четвертого рівня змінилися позитивно. До експерименту ми спостерігаємо високий відсоток вчителів, які оцінюють свою ІКТ-компетентність на «низькому» рівні. Однак після експерименту 64% вчителів отримали нові знання та навички і позитивно оцінили рівень ІКТ компетентності. Такі вчителі здатні створювати умови для активної співпраці з колегами, батьками, учнями засобами віртуального класу та ІКТ.

П'ятий рівень — «Дослідницький рівень». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 2% до 5%, на середньому з 31% до 53%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 67% до 42%. Основні показники ІКТ-компетентності п'ятого рівня змінилися позитивно на «середньому» рівні.

Шостий рівень — «Рівень експертів». Експериментальні дані показали, що рівень ІКТ-компетентності зріс на високому рівні з 1% до 5%, на середньому з 28% до 42%, а початковий рівень після експерименту зменшився з 71% до 53%. Основні показники ІКТ компетентності шостого рівня змінилися позитивно як на «високому», так і на «середньому» рівні. Вчителі здатні демонструвати лідерство в питаннях інтеграції технологій у предметну область і сприяти популяризації власного педагогічного досвіду.

Отже, гіпотеза підтвердилася: вчителі-предметники підвищили свій рівень ІКТ-компетентності після експерименту більше, ніж до початку експерименту.

Важливу роль у проведенні педагогічних досліджень відіграли учні, для яких і впроваджуються ці технології. При проведенні традиційних занять, в тому числі і самостійної роботи, неможливо від учня штучно вимагати активності, учня треба спонукати до неї, як зазначає Васильченко Л.В. Активність — це вміння учня самостійно шукати, сприймати і переробляти навчальні дані. Активно переробляти навчальні дані означає готовність учня застосувати їх у різних навчальних ситуаціях [7, с.47]. Рівень активізації діяльності учнів підвищується під час чітко продуманої вчителем системи вправ і завдань «від простого до складного», завдяки використанню відео- і аудіо- навчальних фрагментів, ігрових моментів, можливості ставити запитання і коментувати дії інших учнів. Технології віртуального класу дозволяють підтримувати дух змагань завдяки одночасному (паралельному) розв'язанню логічних вправ, прикладів, кросвордів, створенню графічних об'єктів.

На початку навчального року (вересень) вчителі не використовують електронні тести, книги, відеоматеріали. Основна мета цього періоду — установчі дії щодо організації навчального процесу та повторення за минулий рік. Активізація проявляється у період підсумкових контрольних робіт (жовтень, грудень, березень). Електронне тестування використовується майже на кожному уроці як перевірка отриманих навичок учнем та під час тематичного оцінювання.

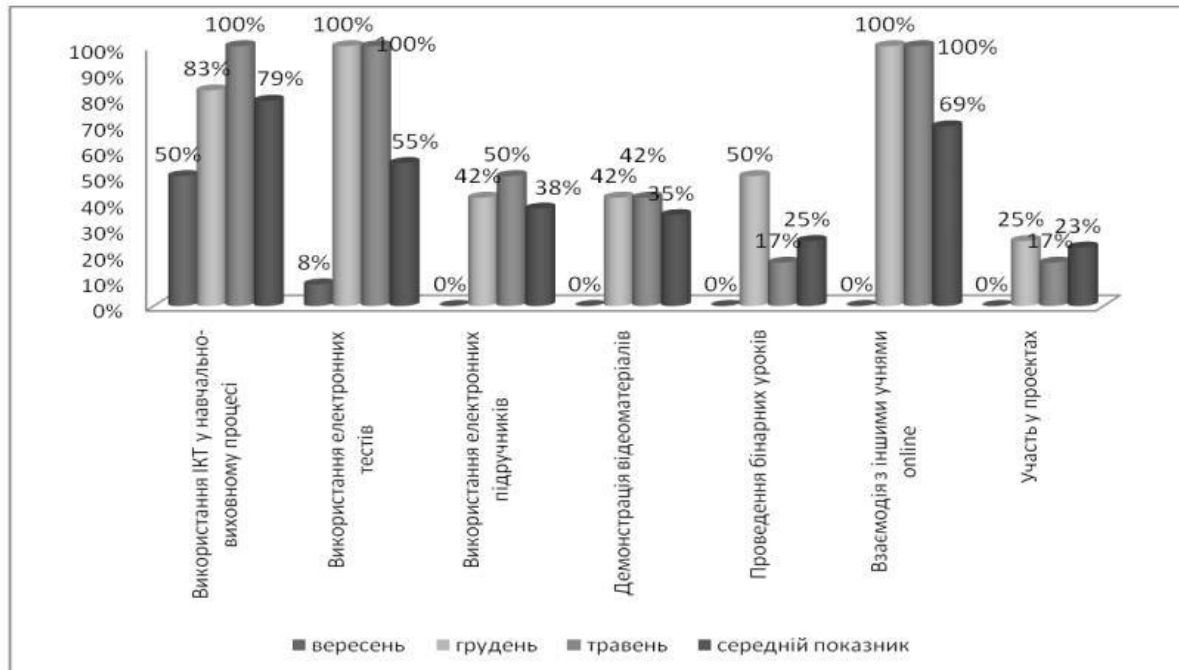


Рис.1. Удосконалення організації індивідуального навчання учнів

Основні періоди — це грудень, травень. Електронні книги використовуються у період відпрацювання окремих тем уроків. Відеоматеріали у достатній кількості розміщено в соціальних мережах (YouTube), проте вчителі недостатньо використовують їх під час уроків. Відповідно до навчальних цілей, учні самостійно знаходили в Інтернеті відеоматеріали до уроків біології, природи, географії. Бінарні уроки вимагають відповідної підготовки двох вчителів, навчальних матеріалів, інтегрованих тестів. Під час навчального року бінарні уроки проводилися тільки у період, коли теми навчальних предметів були схожими або доповнювалися. Упровадження технологій віртуального класу дало поштовх до активного спілкування учнів засобами Skype, електронної пошти та ICQ. Основні результати порівнювалися у вересні — на початку навчального року, у грудні — закінчення першого семестру, у травні — закінчення другого семестру, а також враховувалися середні показники за рік. Результати аналізу представлені на рис.1.

У порівнянні з середніми показниками за рік тенденція до використання в організації навчання учнів додаткових електронних навчальних матеріалів збільшилася за всіма показниками. Високі показники електронного тестування адекватні, оскільки грудень і травень — це закінчення першого та другого семестрів відповідно. Експеримент показує, що використання технологій віртуального класу дозволяє вивести урок на якісно новий рівень, підвищує значущість і статус викладача, розширює можливості інтерактивного супроводу уроку для дітей, які знаходяться вдома, вдосконалює участь дітей у проєктах. Технології віртуального класу виступають технологіями активізації пізнавальної діяльності учнів.

### Висновки

На основі теоретичного і експериментального дослідження проблеми використання технологій віртуального класу вчителем в організації індивідуального навчання учнів зроблено такі висновки:

1. Аналіз наукових та літературних джерел показав, що практика вітчизняних та зарубіжних учених відображає пошук шляхів удосконалення системи надання освітніх послуг, дав змогу зрозуміти сутність і особливості технологій віртуального класу як дієвої форми.

2. З метою удосконалення індивідуальної форми навчання адаптовано сервіс WiZiQ і застосовано технології віртуального класу до організації навчально-виховного процесу.

3. Розроблено критерії визначення рівня активізації пізнавальної діяльності учнів та підвищення рівня ІКТ-компетентності вчителів.

4. Технології віртуального класу в системі вправ, творчих завдань активізують пізнавальну діяльність учня, що підтверджено педагогічним експериментом. Встановлено, що навчання може здійснюватися незалежно від місця знаходження учня, достатньо мати ноутбук і доступ до мережі Інтернет. Показано, що в результаті використання технологій віртуального класу вчителі-предметники самостійно планують урок, розсилають запрошення, розробляють презентації та завантажують їх для демонстрації, користуються графічним планшетом, відбирають відео- та аудіофайли. Подальші дослідження можна здійснити за такими напрямками: технології віртуального класу в роботі з обдарованими учнями, система використання технологій віртуального класу для роботи в навчальних проектах, технології віртуального класу для активізації пізнавальної діяльності учнів під час вивчення іноземних мов.

### Список використаної літератури

1. Биков В. Ю. Класифікація засобів навчання / В. Ю. Биков, Ю. О. Жук // Інформаційні технології і засоби навчання : зб. наук. праць. – К., 2005. – С. 48–53.
2. Жабєєв Г. В. Методика використання інтернет-ресурсів у процесі профільного навчання фізики : автореф. дис. канд. пед. наук : 13.00.02 / Г. В. Жабєєв. – К., 2009. – 20 с.
3. Морзе Н. В. Підготовка педагогічних кадрів до використання комп'ютерних телекомунікацій / Наталія Вікторівна Морзе // Комп'ютерно орієнтовані системи навчання : зб. наук. праць. – К., 2003. – Вип. 6. – С. 12–25.
4. Byrne Denice A study of individual learning styles and educational multimedia preferences / Denice Byrne [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.compapp.dcu.ie/~mfarren/denice.pdf>. – Назва з екрана.
5. Littlefield J. 10 Reasons to Choose Online Education [Електронний ресурс] / Jamie Littlefield. – Режим доступу: <http://distanselearn.about.com/od/distancelearning101/tp/10-Reasons-to-Choose-Online-Education.htm>. – Назва з екрана.
6. Морзе Н. В. Методика навчання інформатики : навч. посіб. у 4 ч. / Наталія Вікторівна Морзе; за ред. М. І. Жалдака. – К. : Навч. книга, 2003. – Ч. I : Загальна методика навчання інформатики. – 254 с.
7. Васильченко Л. В. Дистанційне навчання : науково-методичне забезпечення; інформаційний простір навчального закладу / Л. В. Васильченко, В. Л. Шевченко. – Х.: Вид. група «Основа», 2009. – 208 с. – (Б-ка журналу «Управління школою»; Вип. 1 (73)).
8. Триус Ю.В. Комп'ютерно-орієнтовані методичні системи навчання математичних дисциплін у вищих навчальних закладах: автореф. дис. д-ра пед. наук: спец. 13.00.02 / Ю.В.Триус. К., 2005. -51с.
9. Жалдак М. И. Система подготовки учителя к использованию информационной технологии в учебном процессе : дис в форме науч. доклада д-ра пед. наук: 13.00.02 / Мирослав Иванович Жалдак. – М., 1989. – 48с.
10. Компетентнісний підхід у сучасній освіті : світовий досвід та українські перспективи : Бібліотека з освітньої політики / [під заг. ред. О. В. Овчарук]. – К. : «К.І.С.», 2004. – 112 с.
11. Спірін О.М. Система інформаційно-технологічних компетентностей учителя інформатики /Олег Миколайович Спірін //Інформаційно-комунікаційні технології навчання: матеріали міжнар. Науково-практ. Конф.-Умань: ПП Жовтий, 2008.-С. 160-162.
12. Фокеев М.И. Организационные и методические основы занятий по подготовке сельских школьников к единому государственному экзамену по математике на базе виртуального класса: дис. Канд. Пед. Наук: 13.00.02 /Фокеев Максим Игоревич.-Арзамас, 2009. – 144с.

### References

1. Bykov V. YU. Klyasyfikatsiya zasobiv navchannya / V. YU. Bykov, YU. O. Zhuk // Informatsiyni tekhnolohiyi i zasoby navchannya : zb. nauk. prats. – K., 2005. – S. 48–53.
2. Zhabyeyev H. V. Metodyka vykorystannya internet-resursiv u protsesi profilnoho navchannya fizyky : avtoref. dys. kand. ped. nauk : 13.00.02 / H. V. Zhabyeyev. – K., 2009. – 20 s.

3. Morze N. V. Pidhotovka pedahohichnykh kadriv do vykorystannya komp'yuternykh telekomunikatsiy / Nataliya Viktorivna Morze // Komp'yuterno oriyentovani systemy navchannya : zb. nauk. prats'. – K., 2003. – Vyp. 6. – S. 12–25.
4. Byrne Denice A study of individual learning styles and educational multimedia preferences / Denice Byrne [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.compapp.dcu.ie/~mfarren/denice.pdf>. – Nazva z ekrana.
5. Littlefield J. 10 Reasons to Choose Online Education [Elektronnyy resurs] / Jamie Littlefield. – Rezhym dostupu: <http://distanselearn.about.com/od/distancelearning101/tp/10-Reasons-to-Choose-Online-Education.htm>. – Nazva z ekrana.
6. Morze N. V. Metodyka navchannya informatyky : navch. posib.: u 4 ch. / Nataliya Viktorivna Morze; za red. M. I. Zhaldaka. – K. : Navch. knyha, 2003. – CH. I : Zahal'na metodyka navchannya informatyky. – 254 s.
7. Vasylychenko L. V. Dystantsiynе navchannya : naukovo-metodychne zabezpechennya; informatsiynyy prostir navchal'noho zakladu / L. V. Vasylychenko, V. L. Shevchenko. – KH.: Vyd. hrupa «Osnova», 2009. – 208 s. – (B-ka zhurnalu «Upravlinnya shkoloyu»; Vyp. 1 (73)).
8. Tryus YU.V. Kompyuterno-orientovani metodychni systemy navchannya matematychnykh dystsyplin u vyshchykh navchal'nykh zakladakh: avtoref.dys. d-ra ped. nauk: spets. 13.00.02 / YU.V. Tryus. K., 2005. – 51 s.
9. Zhaldak M. Y. Systema podhotovky uchytyela k yspol'zovanyyu ynformatsyonnoy tekhnolohyy v uchebnom protsesse : dys v forme nauch. doklada d-ra ped. nauk: 13.00.02 / Myroslav Yvanovych Zhaldak. – M., 1989. – 48 s.
10. Kompetentnisnyy pidkhid u suchasniy osviti : svitovyy dosvid ta ukrayins'ki perspektyvy : Biblioteka z osvith'oyi polityky / [pid zah. red. O. V. Ovcharuk]. – K. : «K.I.S.», 2004. – 112 s.
11. Spirin O.M. Systema informatsiyno-tekhnolohichnykh kompetentnostey uchytyela informatyky / Oleh Mykolayovych Spirin // Informatsiyno-komunikatsiyni tekhnolohiyinavchannya: materialy mizhnar. Naukovo-prakt. Konf.-Uman': PP Zhovtyy, 2008. – S. 160-162.
12. Fokeev M.Y. Orhonyzatsyonnye y metodycheskye osnovy zanyatyy po podhotovke sel'skykh shkol'nykov k edynomu hosudarstvennomu ekzamenupo matematyke na baze vyrtual'noho klassa: dys. Kand. Ped. Nauk: 13.00.02 / Fokeev Maksym Yhorevych.-Arzamas, 2009. – 144 s.

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Абашина Анастасія Андріївна</b>       | студентка групи КІ-17 Центральноукраїнського національного технічного університету.<br>E-mail: <a href="mailto:garmonia30@gmail.com">garmonia30@gmail.com</a>                                                                                                                      |
| <b>Амуров Антон Вікторович</b>           | аспірант кафедри аерогидромеханики и энергомассопереноса Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:amurov2@gmail.com">amurov2@gmail.com</a>                                                                                     |
| <b>Андрейцев Андрій Юрійович</b>         | к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики державного економіко-технологічного університету транспорту<br>E-mail: <a href="mailto:smirnovkpi@gmail.com">smirnovkpi@gmail.com</a>                                                                                                   |
| <b>Ахметшина Людмила Георгіївна</b>      | д.т.н., професор кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. О. Гончара<br>E-mail: <a href="mailto:akhmlu1@gmail.com">akhmlu1@gmail.com</a>                                                                                              |
| <b>Бабка Віталій Миколайович</b>         | к.т.н., доцент, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України.<br>E-mail: <a href="mailto:babkavitaliy@ukr.net">babkavitaliy@ukr.net</a>                                                 |
| <b>Баклан Ігор Всеволодович</b>          | к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,<br>E-mail: <a href="mailto:iaa@ukr.net">iaa@ukr.net</a>                            |
| <b>Баклан Ярослав Ігорович</b>           | к.т.н., старший викладач кафедри автоматики та управління в технічних системах (АУТС), Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,<br>E-mail: <a href="mailto:yaroslav.baklan@gmail.com">yaroslav.baklan@gmail.com</a> |
| <b>Бандирський Богдан Йосипович</b>      | к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка",<br>E-mail: <a href="mailto:bogdan.polynet@gmail.com">bogdan.polynet@gmail.com</a>                                                                                      |
| <b>Барабанов Микола Олексійович</b>      | ст.викл. кафедри радіотехнічних пристроїв Одеського національного політехнічного університету.<br>E-mail: <a href="mailto:bmo@opu.ua">bmo@opu.ua</a>                                                                                                                               |
| <b>Беглов Костянтин Вячеславович</b>     | к.т.н., доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:beglov.kv@opu.ua">beglov.kv@opu.ua</a>                                                                                              |
| <b>Березюк Ірина Анатоліївна</b>         | к.т.н., доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:shapovalovai@ukr.net">shapovalovai@ukr.net</a>                                                                                    |
| <b>Белінський Іван Васильович</b>        | к.ф.-м.н., пров.н.с. Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України,<br>E-mail: <a href="mailto:vgv_igf@ukr.net">vgv_igf@ukr.net</a>                                                                                                               |
| <b>Белов Андрій Сергійович</b>           | бакалавр кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:fearess7@gmail.com">fearess7@gmail.com</a>                                                                                 |
| <b>Бразалук Юлія Володимирівна</b>       | к.ф.-м.н., старший науковий співробітник НДЛ «Моделювання процесів механіки рідини і газу та тепломасообміну» Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара<br>E-mail: <a href="mailto:brazaluk_jv@ukr.net">brazaluk_jv@ukr.net</a>                                 |
| <b>Броварець Олександр Олександрович</b> | к.т.н., доцент, завідувач кафедри інформаційно-технічних та природничих дисциплін, Київський кооперативний інститут бізнесу і права,<br>E-mail: <a href="mailto:brovaretsnau@ukr.net">brovaretsnau@ukr.net</a>                                                                     |
| <b>Валько Наталія Валеріївна</b>         | к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри інформатики, програмної інженерії та економічної кібернетики Херсонського державного університету, (066-700-62-93; DOI 0000-0003-0720-3217, e-mail: <a href="mailto:valko@ksu.ks.ua">valko@ksu.ks.ua</a> )                                       |



|                                           |                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Венгрович Дмитро Богданович</b>        | к.ф.-м.н., Керівник відділення геодинаміки вибуху ІГФ Інститут геофізики НАН України<br>E-mail: <a href="mailto:yengrovich@gmail.com">yengrovich@gmail.com</a>                                                                             |
| <b>Веселовська Галина Вікторівна</b>      | к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету,<br>e-mail: <a href="mailto:galina.veselovskaya@gmail.com">galina.veselovskaya@gmail.com</a>                                    |
| <b>Вороненко Сергій Вікторович</b>        | викладач кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії<br>E-mail: <a href="mailto:vr.sergey@ukr.net">vr.sergey@ukr.net</a>                                               |
| <b>Вяля Юлия Эдуардовна</b>               | старший преподаватель кафедры высшей и прикладной математики государственного университета инфраструктуры и технологий,<br>E-mail: <a href="mailto:j-mineewa@ukr.net">j-mineewa@ukr.net</a>                                                |
| <b>Гальченко Володимир Якович</b>         | д.т.н., професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:halchvl@gmail.com">halchvl@gmail.com</a>                             |
| <b>Гармаш Анастасія Юрївна</b>            | студент кафедри механіки суцільних середовищ та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».<br>E-mail: <a href="mailto:garmash.anastasiya29@gmail.com">garmash.anastasiya29@gmail.com</a> |
| <b>Гвоздева Ирина Маратовна</b>           | д.т.н., професор кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету «Одеська морська академія»<br>E-mail: <a href="mailto:onopchenko.im@gmail.com">onopchenko.im@gmail.com</a>                                        |
| <b>Гейлик Анастасия Вадимовна</b>         | к.п.н., доцент кафедри высшей и прикладной математики государственного университета инфраструктуры и технологий,<br>E-mail: <a href="mailto:geilik@meta.ua">geilik@meta.ua</a>                                                             |
| <b>Гнатушенко Володимир Володимирович</b> | д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)<br>E-mail: <a href="mailto:yvgnat@ukr.net">yvgnat@ukr.net</a>                            |
| <b>Гнисько Василий Иванович</b>           | к.т.н., старший научный сотрудник отдела аэромеханики энергетических машин Института проблем машиностроения НАН Украины,<br>E-mail: <a href="mailto:gnytkovi@gmail.com">gnytkovi@gmail.com</a>                                             |
| <b>Гоменюк Сергій Іванович</b>            | д.т.н., декан математичного факультету Запорізького національного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:gserega71@gmail.com">gserega71@gmail.com</a>                                                                                    |
| <b>Гошко Любомир Васильович</b>           | к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики Національного університету "Львівська політехніка",<br>E-mail: <a href="mailto:avantes@gmail.com">avantes@gmail.com</a>                                                                 |
| <b>Гребенюк Сергій Миколайович</b>        | д.т.н., завідувач кафедри фундаментальної математики Запорізького національного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:gsm1212@ukr.net">gsm1212@ukr.net</a>                                                                              |
| <b>Грищенко Ірина Юрївна</b>              | к.т.н., доцент, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України.<br>E-mail: <a href="mailto:irgr@yahoo.com">irgr@yahoo.com</a>                     |
| <b>Губин Александр Игоревич</b>           | к.т.н., доцент кафедри аэрогидромеханики и энергомассопереноса Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:gubin_ai@ukr.net">gubin_ai@ukr.net</a>                                         |
| <b>Гурченко Наталія Петрівна</b>          | Викладач Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:oshigor51@gmail.com">oshigor51@gmail.com</a>                                                                                                       |
| <b>Гучек Петро Йосипович</b>              | д.т.н., доцент, фахівець лабораторії біомедичної оптики Інституту біокібернетики і біомедичної інженерії ім. М.Налеча Польської академії наук, Польща (067-553-23-26, <a href="mailto:phuchek@gmail.com">phuchek@gmail.com</a> )           |
| <b>Демиров Владислав Викторович</b>       | аспірант кафедри електрооборудовання и автоматики судов Национального университета "Одесская морская академия",<br>E-mail: <a href="mailto:demirov.vlad@gmail.com">demirov.vlad@gmail.com</a>                                              |

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Деренг Євгенія Володимирівна</b>      | аспірантка Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України.<br>E-mail: <a href="mailto:jenechka_ua@ukr.net">jenechka_ua@ukr.net</a>                                                                                                 |
| <b>Добаріна Ольга Володимирівна</b>      | магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету.<br>E-mail: <a href="mailto:dobarina201973@gmail.com">dobarina201973@gmail.com</a>                                                              |
| <b>Дорош Наталія Леонідівна</b>          | к.т.н. доцент кафедри інформаційних технологій та систем Дніпропетровської Національної металургійної академії України,<br>E-mail: <a href="mailto:natalidorosh53@gmail.com">natalidorosh53@gmail.com</a>                                                 |
| <b>Дрогомирецька Христина Теофілівна</b> | к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики Національного університету «Львівська політехніка»<br>E-mail: <a href="mailto:christdr@mail.lviv.ua">christdr@mail.lviv.ua</a>                                                                                 |
| <b>Дубровін Валерій Іванович</b>         | к.т.н., професор кафедри програмних засобів ЗНТУ<br>E-mail: <a href="mailto:vdubrovin@gmail.com">vdubrovin@gmail.com</a>                                                                                                                                  |
| <b>Дудченко Олег Миколайович</b>         | к.т.н., доцент, заступник директора з навчальної роботи Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова ((0552) 26-30-09, <a href="mailto:kbnuos@gmail.com">kbnuos@gmail.com</a> )                                        |
| <b>Євдокимов Дмитро Васильович</b>       | старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования процессов механики жидкости и газа и тепломассообмена Днепровского национального университета имени Олеся Гончара.<br>E-mail: <a href="mailto:devd@ukr.net">devd@ukr.net</a> |
| <b>Єгоров Артем Олександрович</b>        | старший викладач кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпровського національного університету ім. О. Гончара<br>E-mail: <a href="mailto:egorov@mayak.dp.ua">egorov@mayak.dp.ua</a>                                                          |
| <b>Ємельянов Сергій Вікторович</b>       | ст.викл. кафедри радіотехнічних пристроїв Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:emelianov@opu.ua">emelianov@opu.ua</a>                                                                                           |
| <b>Жерновий Вадим Вікторович</b>         | аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро).<br>E-mail: <a href="mailto:vadim.zhernovoy@gmail.com">vadim.zhernovoy@gmail.com</a>                              |
| <b>Іщенко Іван Михайлович</b>            | кандидат технічних наук, професор кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії<br>E-mail: <a href="mailto:vr.sergey@ukr.net">vr.sergey@ukr.net</a>                                     |
| <b>Клименко Михайло Іванович</b>         | к.ф.-м.н., доцент кафедри фундаментальної математики Запорізького національного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:m1655291@gmail.com">m1655291@gmail.com</a>                                                                                       |
| <b>Кондратець Василь Олександрович</b>   | д.т.н., професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:matsuyan@ukr.net">matsuyan@ukr.net</a>                                                                 |
| <b>Кондратьева Інна Юрьевна</b>          | аспірант кафедри технічної кибернетики, Херсонський національний технічний університет,<br>E-mail: <a href="mailto:inna2017ukr@ukr.net">inna2017ukr@ukr.net</a>                                                                                           |
| <b>Корчинский Владимир Михайлович</b>    | д.т.н., професор, завідувач кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:korchins50k@i.ua">korchins50k@i.ua</a>                                                   |
| <b>Костенко Олена Михайлівна</b>         | д.т.н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи Полтавської державної аграрної академії.<br>e-mail: <a href="mailto:kostenko@pdau.edu.ua">kostenko@pdau.edu.ua</a>                                                                                |
| <b>Кошова Ірина Іванівна</b>             | аспірант кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ».<br>e-mail: <a href="mailto:kafedraapi@ukr.net">kafedraapi@ukr.net</a>                                     |
| <b>Кошовий Микола Дмитрович</b>          | д.т.н., професор, завідувач кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ».<br>e-mail: <a href="mailto:kafedraapi@ukr.net">kafedraapi@ukr.net</a>                  |

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Кресан Тетяна Анатоліївна</b>          | к.т.н., завідувач кафедри природничо-математичних дисциплін відокремленого підрозділу НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут".<br>e-mail: <a href="mailto:tanyakresan@i.ua">tanyakresan@i.ua</a>                                                        |
| <b>Куделькин Руслан Игоревич</b>          | аспірант кафедри електрооборудовання и автоматики судов національного университета «Одесская морская академия»<br>E-mail: <a href="mailto:nuoma.rus@gmail.com">nuoma.rus@gmail.com</a>                                                                            |
| <b>Кудін Олексій Володимирович</b>        | к.ф.-м.н., доцент кафедри прикладної математики і механіки Запорізького національного університету<br>E-mail: <a href="mailto:avk256@gmail.com">avk256@gmail.com</a>                                                                                              |
| <b>Кузьмич Людмила Василівна</b>          | к.пед.н., доцент кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету (066-972-99-37; DOI 0000-0002-6727-9064, e-mail: <a href="mailto:kuzmich121251@ukr.net">kuzmich121251@ukr.net</a> )                                     |
| <b>Куніцин Максим Володимирович</b>       | аспірант кафедри Вищої математики та моделювання систем Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:kunicyn.maksim@gmail.com">kunicyn.maksim@gmail.com</a>                                                                     |
| <b>Лебеденко Юрій Олександрович</b>       | к.т.н., доцент кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:lebedenko@kntu.net.ua">lebedenko@kntu.net.ua</a>                                                                |
| <b>Лемешко Володимир Антонович</b>        | Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України,<br>E-mail: <a href="mailto:ygv_igf@ukr.net">ygv_igf@ukr.net</a>                                                                                                                   |
| <b>Лужков Дмитро Михайлович</b>           | аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:srg2005@ukr.net">srg2005@ukr.net</a>                                                                                   |
| <b>Луковцев Валерий Сергеевич</b>         | к.т.н., доцент, зав. кафедри електрооборудовання и автоматики судов національного университета «Одесская морская академия».<br>E-mail: <a href="mailto:Lukovtsev1950@gmail.com">Lukovtsev1950@gmail.com</a>                                                       |
| <b>Ляшко Ольга Викторовна</b>             | к.ф.-м.н., зав. кафедри высшей и прикладной математики государственного университета инфраструктуры и технологий,<br>E-mail: <a href="mailto:olga_liashko@ukr.net">olga_liashko@ukr.net</a>                                                                       |
| <b>Мазманішвілі Олександр Сергійович</b>  | д.ф.-м.н., старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ НАНУ<br>E-mail: <a href="mailto:mazmanishvili@gmail.com">mazmanishvili@gmail.com</a>                                                                                                                            |
| <b>Мацуй Анатолій Миколайович</b>         | к.т.н., доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:matsuyan@ukr.net">matsuyan@ukr.net</a>                                                                           |
| <b>Мельник Ігор Віталійович</b>           | д.т.н., професор кафедри електронних приладів та пристроїв Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»<br>E-mail: <a href="mailto:i.melnyk@kpi.ua">i.melnyk@kpi.ua</a>                                                              |
| <b>Мельник Наталія Богданівна</b>         | к. ф.-м. н., доцент кафедри програмного забезпечення Національного університету «Львівська політехніка».<br>E-mail: <a href="mailto:melnyk.n.pz@gmail.com">melnyk.n.pz@gmail.com</a>                                                                              |
| <b>Миргород Володимир Федорович</b>       | д.т.н., доцент, завідувач кафедрою Військової академії (м. Одеса)<br>E-mail: <a href="mailto:y.f.mirgorod@gmail.com">y.f.mirgorod@gmail.com</a>                                                                                                                   |
| <b>Мусій Роман Степанович</b>             | д.ф.-м.н., професор кафедри вищої математики Національного університету «Львівська політехніка»<br>E-mail: <a href="mailto:musiy@polynet.ua">musiy@polynet.ua</a>                                                                                                 |
| <b>Осадчий Сергій Іванович</b>            | д.т.н., професор завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:srg2005@ukr.net">srg2005@ukr.net</a>                                                                 |
| <b>Очеретяний Олександр Костянтинович</b> | аспірант кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,<br>E-mail: <a href="mailto:s.ocheretyany@gmail.com">s.ocheretyany@gmail.com</a> |
| <b>Ошаровська Олена Володимирівна</b>     | к.т.н., доцент Одеської національної академії зв'язку<br>E-mail: <a href="mailto:osharovskaya@gmail.com">osharovskaya@gmail.com</a>                                                                                                                               |

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ошаровський Ігор Володимирович</b>   | Завідувач лабораторією Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:oshigor51@gmail.com">oshigor51@gmail.com</a>                                                                                                                                                                                 |
| <b>Петречук Ліна Миколаївна</b>         | старший викладач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Національної металургійної академії України,<br>E-mail: <a href="mailto:petrechukln@gmail.com">petrechukln@gmail.com</a>                                                                                                                                  |
| <b>Пилипака Сергій Федорович</b>        | д.т.н., професор, завідувач кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України<br>E-mail: <a href="mailto:Psf55@ukr.net">Psf55@ukr.net</a>                                                                                                           |
| <b>Поливода Владислав Володимирович</b> | к.т.н., доцент кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:polivodavv@rambler.ru">polivodavv@rambler.ru</a>                                                                                                                                                        |
| <b>Поливода Оксана Валеріївна</b>       | к.т.н., доцент кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:pov81@ukr.net">pov81@ukr.net</a>                                                                                                                                                                        |
| <b>Пономаренко Олена Володимирівна</b>  | студентка, E-mail <a href="mailto:willssqq@gmail.com">willssqq@gmail.com</a>                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Починок Аліна Володимирівна</b>      | к.т.н., доцент кафедри інформаційних систем і технологій Навчально-наукового інституту інформаційних технологій та менеджменту Університету державної фіскальної служби України<br>E-mail: <a href="mailto:alina_pochynok@yahoo.com">alina_pochynok@yahoo.com</a>                                                                  |
| <b>Реута Олександр Васильович</b>       | к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:reutaov@gmail.com">reutaov@gmail.com</a>                                                                                                                             |
| <b>Решетняк Николай Григорьевич</b>     | к. ф.-м. н., доцент, старший научный сотрудник ННЦ ХФТИ<br>E-mail: <a href="mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua">nreshetnyak@kipt.kharkov.ua</a>                                                                                                                                                                                    |
| <b>Розова Людмила Викторовна</b>        | к.т.н., доцент кафедры механики сплошных сред и сопротивления материалов Харьковского политехнического института,<br>E-mail: <a href="mailto:luda.rozova@gmail.com">luda.rozova@gmail.com</a>                                                                                                                                      |
| <b>Романов Володимир Олександрович</b>  | д.т.н., проф., відділ перетворювачів інформації Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,<br>E-mail: <a href="mailto:brovaretsnau@ukr.net">brovaretsnau@ukr.net</a>                                                                                                                                                   |
| <b>Рудакова Ганна Володимирівна</b>     | д.т.н., професор кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:rudakovaanna25@gmail.com">rudakovaanna25@gmail.com</a>                                                                                                                         |
| <b>Свинаренко Дмитро Миколайович</b>    | к.т.н., доцент, декан факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, доцент кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:dekan_ffeks@ukr.net">dekan_ffeks@ukr.net</a> |
| <b>Смирнов Игорь Владимирович</b>       | д.т.н., зав. кафедри инженерии поверхности национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,<br>E-mail: <a href="mailto:smirnovkpi@gmail.com">smirnovkpi@gmail.com</a>                                                                                                   |
| <b>Соколов Андрій Євгенович</b>         | к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:sokol8484@inbox.ru">sokol8484@inbox.ru</a>                                                                                                                                                  |
| <b>Соколова Наталя Олегівна</b>         | ст.викл. кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:n.olegowna@gmail.com">n.olegowna@gmail.com</a>                                                                                                                             |
| <b>Толпекіна Галина Миколаївна</b>      | к.п.н. доцент кафедри фізичного та математичного моделювання Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д.Ушинського,<br>E-mail: <a href="mailto:galina_tolpekina@gmail.com">galina_tolpekina@gmail.com</a>                                                                                                 |

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Трембовецька Руслана Володимирівна</b> | к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:r.trembovetska@chdtu.edu.ua">r.trembovetska@chdtu.edu.ua</a>             |
| <b>Трохимчук Петро Павлович</b>           | к.ф.-м.н., доцент кафедри теоретичної та математичної фізики Східноєвропейського національного університету ім. Лесі Українки<br>E-mail: <a href="mailto:trope53@yahoo.com">trope53@yahoo.com</a>                                           |
| <b>Усов Анатолій Васильович</b>           | д.т.н., професор, завідувач кафедрою вищої математики і моделювання систем Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:Usov-a-v@mbei.opu.ua">Usov-a-v@mbei.opu.ua</a>                                    |
| <b>Федорина Тетяна Петрівна</b>           | к.п.н., завідувач кафедри загально інженерних дисциплін відокремленого підрозділу НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут".<br>E-mail: <a href="mailto:ged_dep@nati.org.ua">ged_dep@nati.org.ua</a>                                |
| <b>Фененко Тетяна Михайлівна</b>          | старший викладач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Національної металургійної академії України,<br>E-mail: <a href="mailto:fenenko53@gmail.com">fenenko53@gmail.com</a>                                               |
| <b>Фонар Людмила Сергіївна</b>            | к.т.н., старший викладач кафедри радіотехнічних пристроїв Одеського національного політехнічного університету<br>E-mail: <a href="mailto:Fonar_L_S@ukr.net">Fonar_L_S@ukr.net</a>                                                           |
| <b>Хабраман Хаді</b>                      | аспірант кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:hadihabrumman@gmail.com">hadihabrumman@gmail.com</a>                                          |
| <b>Ходаков Віктор Єгорович</b>            | д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету,<br>E-mail: <a href="mailto:hodakov.victor@gmail.com">hodakov.victor@gmail.com</a> |
| <b>Хошаба Александр Мирославович</b>      | кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины.<br>E-mail: <a href="mailto:Oleksandr.Khoshaba@gmail.com">Oleksandr.Khoshaba@gmail.com</a>  |
| <b>Царенко Микола Олександрович</b>       | к. т. н., доцент, кафедри прикладної математики та інформатики, "Державний заклад" Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського»,<br>E-mail: <a href="mailto:mtsarenko@ukr.net">mtsarenko@ukr.net</a>    |
| <b>Царук Олександр Володимирович</b>      | аспірант Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,<br>E-mail: <a href="mailto:brovaretsnau@ukr.net">brovaretsnau@ukr.net</a>                                                                                                   |
| <b>Юськів Олеся Ігорівна</b>              | адміністратор задач, ПрАТ «Дніпроспецсталь»,<br>E-mail: <a href="mailto:yuskivolesya@rambler.ru">yuskivolesya@rambler.ru</a>                                                                                                                |
| <b>Якименко Марія Андріївна</b>           | магістр кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету "Одеська морська академія".<br>E-mail: <a href="mailto:onopchenko.im@gmail.com">onopchenko.im@gmail.com</a>                                                 |
| <b>Якунін Анатолій Олександрович</b>      | д.т.н., с.н.с., професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара,<br>E-mail: <a href="mailto:yakunin.anatoliy@gmail.com">yakunin.anatoliy@gmail.com</a>          |
| <b>Ярецька Наталія Олександрівна</b>      | к.ф.-м.н., старший викладач кафедри вищої математики та комп'ютерних застосувань Хмельницького національного університету.<br>E-mail: <a href="mailto:massacran2@ukr.net">massacran2@ukr.net</a>                                            |



# **ВІСНИК**

## **Херсонського національного технічного університету**

|                          |                                                                                                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Відповідальний за випуск | Хомченко Анатолій Никифорович,<br>д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч<br>науки і техніки України |
| Технічний редактор       | Литвиненко Олена Іванівна<br>к.т.н., доцент                                                       |
| Макетування              | Омельчук А.А.                                                                                     |

Свідоцтво про державну реєстрацію засобу масової інформації –  
серія KB № 17371-6141 от 17.12.2010

Підписано до друку 29.08.2019 р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.  
Ум. друк. Аркушів 35,81. Замовлення № 12. Тираж 120 прим.

Матеріали друкуються в авторській редакції.  
Відповідальність за достовірність даних, зазначених у статтях,  
несуть їх автори.

© Херсонський національний технічний університет 2019

Видавництво та друк: «ОЛДІ-ПЛЮС»  
73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а  
E-mail: office@oldiplus.com  
Свід. ДК No 6532 від 13.12.2018 р.