

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Серія : Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

1/2016

Головний редактор д.т.н., професор **Лега Ю. Г.**

Редакційна колегія:

Заболотній С. В., д.т.н., доц.
(заступник головного редактора)
Астрелін І. М., д.т.н., проф.
Ващенко В. А., д.т.н., проф.
Волошин М. Д., д.т.н., проф.
Дідковський Р. М., д.т.н., проф.
Кажіс Р., д.т.н., проф. (Литва)
Канашевич Г. В., д.т.н., проф.
Котов В. М., д.т.н., проф. (Білорусь)
Кулик А. Я., д.т.н., проф.
Лужецький В. А., д.т.н., проф.
Лукашенко В. М., д.т.н., проф.
Мальований М. С., д.т.н., проф.
Мінаєв Б. П., д.х.н., проф.
Мусієнко М. П., д.т.н., проф.
Осипенко В. І., д.т.н., проф.
Палагін В. В., д.т.н., проф.
Паламарчук І. П., д.т.н., проф.
Первунінський С. М., д.т.н., проф.
Петрищев О. М., д.т.н., проф.
Положаєнко С. А., д.т.н., проф.
Рибін О. І., д.т.н., проф.
Рудницький В. М., д.т.н., проф.
Сетлак Г., д.ф.н. (Польща)
Слатінеану Л., д.т.н., проф. (Румунія)
Снитюк В. Є., д.т.н., проф.
Столяренко Г. С., д.т.н., проф.
Тесля Ю. М., д.т.н., проф.
Тимченко А. А., д.т.н., проф.
Хоменко О. М., к.х.н., доц.
Мельник І. В. (відповідальний секретар редакції)

☐ КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ
І КОМПОНЕНТИ,
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

☐ МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ
ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ

☐ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
І АВТОМАТИКА

☐ МАШИНОБУДУВАННЯ

☐ ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
І ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Електронна версія: vtn.chdtu.edu.ua

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, ІІ корпус, к. 246,
бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 73-02-29
chstu@chstu.cherkassy.ua

ЗАСНОВНИК –
Черкаський державний
технологічний університет

I • 2016

ВІСНИК
Черкаського державного
технологічного університету

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK
Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

SERIA: TEHNICHNI NAUKY

Затверджено наказом
Міністерства освіти і науки України
№ 1328 від 21.12.2015
як фахове видання з технічних наук

ISSN 2306-4455

Свідоцтво про державну
реєстрацію друкованого засобу
масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002 р.

Затверджено рішенням
Вченої ради Черкаського
державного технологічного
університету, протокол № 13
від 16.05.2016 р.

Точка зору редколегії не завжди
збігається з позицією авторів.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на “Вісник ЧДТУ”
є обов’язковим.

© “Вісник Черкаського
державного технологічного
університету”, № 1, 2016

ЗМІСТ

Бабенко В. Г., Лада Н. В., Лада С. В. Дослідження взаємозв'язків між операціями в матричних моделях криптографічного перетворення	5
Положаєнко С. А., Мухиалдин Х. М. Математическая модель реологии фрактально-неоднородных многокомпонентных пластовых систем.....	12
Мусієнко М. П., Журавська І. М. Алгоритми прокладання маршруту безпілотних літальних апаратів на основі застосування нейронних мереж Хопфілда	20
Колесніков К. В., Карапетян А. Р., Баган В. Ю. Аналіз результатів дослідження реалізації задачі маршрутизації на основі нейронних мереж та генетичних алгоритмів.....	28
Пилипенко О. М., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку м. Черкаси	35
Манько В. М., Зотов В. М. Принципи прогнозування і математичного моделювання зміни опору систем ізоляції електродвигунів поліграфічних машин та комплексів.....	41
Воробкало Т. В., Гавриш О. С., Андрієнко О. І. Синтез алгоритмів спільного оцінювання доплерівського зсуву частоти та параметрів асиметричної завади.....	48
Кожухівський А. Д., Горбенко О. В. Розробка емулятора для моделювання системи навігації і управління мобільним роботом.....	55
Гусятинська Н. А., Романченко Н. М., Тетеріна С. М. Удосконалення схеми очищення клеровки тростинного цукру-сирцю із застосуванням засобів на основі активного хлору.....	61
Білокінь С. О. Комплексне дослідження фізико-механічних властивостей біологічних об'єктів.....	67
Мельник В. В., Частоколенко І. П., Марченко А. П. Математична модель визначення середнього фактичного часу виконання одного етапу будівельно-монтажних робіт в умовах збурюючих впливів	72
Бондаренко Ю. Ю., Базіло К. В., Зайка В. М. Розробка мономорфних перетворювачів з використанням просторово-кутової взаємодії вектора електричного поля і вектора поляризації.....	78

ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Колінько С. О., Бутенко Т. І., Кулик Л. О. Використання фахово спрямованих тестових завдань для модульного контролю знань студентів при вивченні загального курсу фізики.....	89
--	----

До 20-річчя заснування «Вісника ЧІТІ – ЧДТУ»

Кунченко-Харченко В. І. Творчий спадок і досягнення наукової школи професора, академіка Юрія Петровича Кунченка	96
--	----

CONTENTS

Babenko V. G., Lada N. V., Lada S. V. Research of the relationships between the operations in matrix models of cryptographic transformation	5
Polozhaenko S. A., Muhialdin H. M. Mathematical model of rheology of fractal-heterogeneous multicomponent stratal systems	12
Musiyenko M. P., Zhuravska I. M. Algorithms for laying of the route of unmanned aerial vehicles based on Hopfield neural networks	20
Kolesnikov K. V., Karapetyan A. R., Bahan V. Yu. The analysis of the investigation results on the realization of routing task based on neural networks and genetic algorithms	28
Pilipenko O. M., Ruban D. P., Ruban H. Ya. Grounding of rational use and replacement of bus park in Cherkasy city	35
Manko V. M., Zotov V. M. Principles of forecasting and mathematical modeling of the change of resistance of insulation systems in electric motors of printing machines and complexes	41
Vorobkalo T. V., Havrysh O. S., Andriyenko O. I. Synthesis of algorithms of joint estimation of Doppler frequency shift and asymmetric interference parameters	48
Kozhukhivskiy A. D., Horbenko O. V. Development of emulator for navigation system modeling and mobile robot control	55
Gusyatynska N. A., Romanchenko N. M., Teterina S. M. Improvement of the scheme for clearance of raw cane sugar melt with the use of available chlorine-based means	61
Bilokin' S. O. Complex study of physical and chemical properties of biological objects	67
Melnik V. V., Chastokolenko I. P., Marchenko A. P. Mathematical model for determination of average actual time for execution of one stage of construction works in the conditions of perturbations	72
Bondarenko Iu. Iu., Bazilo C. V., Zaika V. M. Development of monomorfic converters using spatial and angular interaction of electric field vector and polarization vector	78

EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

Kolinko S. O., Butenko T. I., Kulyk L. O. The use of professionally directed test tasks for modular control of students knowledge in the study of general physics course	89
---	----

TO THE 20TH ANNIVERSARY OF «VISNYK CHITI – CHDTU» FOUNDATION

Kunchenko-Kharchenko V. I. Creative inheritance and achievements of scientific school of a professor, academician Yuriy Kunchenko	96
--	----

В. Г. Бабенко¹, к.т.н., доцент,

доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії

e-mail: zolot_verba@rambler.ru

Н. В. Лада¹, аспірант,

e-mail: LadaHatali256@gmail.com

С. В. Лада², аспірант

e-mail: raphaello1986@gmail.com

¹Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

²Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького

б-р Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ОПЕРАЦІЯМИ В МАТРИЧНИХ МОДЕЛЯХ КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

У статті представлено результати дослідження з використання операцій додавання за модулем два та перестановки для реалізації матричних операцій криптоперетворення. За результатами проведеного обчислювального експерименту здійснено поділ матричних моделей криптоперетворення на три групи за наявністю та типом перестановки в них. У ході аналізу одержаних результатів експерименту виявлено, що взаємозв'язки між операціями, що застосовуються для криптографічного перетворення на основі матричних моделей, характеризуються циклічністю. Отримані цикли послідовності застосування операцій дозволяють будувати операції прямого та оберненого криптоперетворення в групі дворозрядних матричних операцій при використанні запропонованих двоопераційних операцій.

Ключові слова: криптографічне перетворення, операція, матрична модель, взаємозв'язки, пряме та обернене перетворення, перестановка, група, цикл, симетричне та несиметричне перетворення, шифрування, розшифрування, базова матриця, ліва та права підстановка.

Постановка проблеми. Криптографічне шифрування інформації проводиться на основі виконання послідовності операцій криптографічного перетворення. З метою розшифрування зашифрованої інформації необхідно знати послідовність виконання операцій для розшифрування інформації. Необхідно відзначити, що при симетричному криптоперетворенні послідовності шифрування і розшифрування збігаються, а при несиметричному криптоперетворенні послідовності шифрування і розшифрування не збігаються. При розшифруванні зашифрованої інформації зловмисник повинен побудувати послідовність операцій для розшифрування зашифрованої інформації. Складність цієї задачі напряму залежить від довжини послідовності та кількості операцій криптографічного перетворення, які в ній використовуються.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що збільшення кількості операцій, придатних для криптографічного перетворення інформації, дозволить будувати алгоритми захисту

інформації з кращими криптографічними властивостями.

Аналіз останніх досліджень. Особливу увагу у сучасних друкованих виданнях приділено застосуванню матричних операцій криптографічного перетворення та криптопримітивів, побудованих на їх основі, для алгоритмів захисту інформаційних ресурсів [1–4].

Серед останніх досліджень і публікацій варто виділити дослідження матричних операцій криптографічного перетворення, синтезованих на основі операцій додавання за модулем [1, 2], синтез і аналіз операцій двоопераційного криптографічного додавання за модулем два та чотири [1, 4], які можна використовувати для здійснення криптографічного перетворення [3]. Зокрема, в [4] синтезовано групу операцій додавання за модулем два та доведено, що вона є групою перестановок, показано її придатність для використання в алгоритмах криптографічного перетворення.

Проте в цих дослідженнях не було проведено аналізу зв'язків операцій в матричних

операціях криптографічного перетворення для реалізації кодування та розкодування інформації. Отже, дослідження взаємозв'язків між операціями, що використовуються в матричних операціях криптоперетворення, є, безперечно, актуальною темою дослідження.

Метою цього дослідження є виявлення взаємозв'язків між операціями в матричних моделях прямого та оберненого криптографічного перетворення.

Виклад основного матеріалу. Дослідимо можливість використання п'яти моделей операцій додавання за модулем два (опе-

рації 1–5, табл. 1) для реалізації матричних операцій криптоперетворення на прикладі групи з шести дворозрядних операцій матричного криптографічного перетворення (операції 1–6, табл. 2) [1].

При проведенні обчислювального експерименту обмежимося лише поєднанням операцій базової групи та операцій перестановки.

Будемо розглядати ці операції як матричні моделі (матриці) криптографічного перетворення із застосуванням у них відібраних п'яти операцій додавання за модулем два.

Таблиця 1

Основні операції

Модель операції				
$O_1^{\oplus} = \begin{vmatrix} x_1 \oplus y_1 \\ x_2 \oplus y_2 \end{vmatrix}$	$O_2^{\oplus} = \begin{vmatrix} x_1 \oplus y_2 \\ x_2 \oplus y_1 \end{vmatrix}$	$O_3^{\oplus} = \begin{vmatrix} x_2 \oplus y_1 \\ x_1 \oplus y_2 \end{vmatrix}$	$O_4^{\oplus} = \begin{vmatrix} x_2 \oplus y_2 \\ x_1 \oplus y_1 \end{vmatrix}$	$O_5^{\oplus} = \begin{vmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ y_1 \oplus y_2 \end{vmatrix}$

Таблиця 2

Матричні моделі криптографічного перетворення, відібрані для обчислювального експерименту

Номер матриці для перетворення	Кодування	Розкодування
1	$M_1^k = F_{3,5}^d = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$	$M_1^d = F_{3,5}^d = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$
2	$M_2^k = F_{6,5}^k = \begin{pmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{pmatrix}$	$M_2^d = F_{6,5}^d = \begin{pmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{pmatrix}$
3	$M_3^k = F_{3,6}^k = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{pmatrix}$	$M_3^d = F_{3,6}^d = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{pmatrix}$
4	$M_4^k = F_{5,3}^k = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$	$M_4^d = F_{5,3}^d = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$
5	$M_5^k = F_{5,6}^k = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{pmatrix}$	$M_5^d = F_{5,6}^d = \begin{pmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$
6	$M_6^k = F_{6,3}^k = \begin{pmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$	$M_6^d = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \oplus x_2 \end{pmatrix}$

Систематизовані результати обчислювального експерименту наведені в табл. 3, де використані такі позначення: $O_i^{\oplus}$ – двооперандна операція додавання за модулем два з урахуванням перестановки, i – номер операції (згідно з табл. 1); M_j^k – дворозрядна мат-

рична модель операції криптографічного перетворення, j – номер моделі (згідно з табл. 2); $O_i^{\oplus} M_j^k$ – матрична модель операції криптографічного перетворення, в якій використана операція $O_i^{\oplus}$.

Таблиця 3

Результати обчислювального експерименту

	M_1^k	M_2^k	M_3^k	M_4^k	M_5^k	M_6^k
$O_1^\oplus$	$O_1^\oplus M_1^k$	$O_1^\oplus M_2^k$	$O_1^\oplus M_3^k$	$O_1^\oplus M_4^k$	$O_1^\oplus M_5^k$	$O_1^\oplus M_6^k$
$O_2^\oplus$	$O_1^\oplus M_1^k$	$O_2^\oplus M_2^k$	$O_4^\oplus M_3^k$	$O_2^\oplus M_4^k$	$O_3^\oplus M_5^k$	$O_4^\oplus M_6^k$
$O_3^\oplus$	$O_1^\oplus M_1^k$	$O_4^\oplus M_2^k$	$O_3^\oplus M_3^k$	$O_3^\oplus M_4^k$	$O_4^\oplus M_5^k$	$O_2^\oplus M_6^k$
$O_4^\oplus$	$O_1^\oplus M_1^k$	$O_3^\oplus M_2^k$	$O_2^\oplus M_3^k$	$O_4^\oplus M_4^k$	$O_2^\oplus M_5^k$	$O_3^\oplus M_6^k$
$O_5^\oplus$	$O_1^\oplus M_1^k$	-----	-----	$O_5^\oplus M_4^k$	-----	-----

Проаналізуємо результати проведеного за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення обчислювального експерименту, які наведені в табл. 3. Можемо відзначити, що деякі з матриць для перетворення належать до повного симетричного криптоперетворення (M_1^k, M_4^k): послідовності шифрування і розшифрування збігаються для всієї групи операцій, а деякі – до частково несиметричного криптоперетворення: послідовності шифрування і розшифрування не збігаються. А саме, симетричними криптоперетворення M_2^k будуть для операцій $O_1^\oplus, O_2^\oplus, M_3^k$ – для операцій $O_1^\oplus, O_3^\oplus$. Оскільки для M_5^k та M_6^k послідовності шифрування і розшифрування збігаються лише для операції $O_1^\oplus$, що є базовою операцією, то ці матриці можемо умовно віднести до групи матриць для перетворення, що належать до повного несиметричного криптоперетворення. Крім того, при шифруванні M_5^k та M_6^k для їх розшифрування на операціях $O_2^\oplus, O_3^\oplus, O_4^\oplus$, окрім зміни операції, змінюється і матриця розшифрування.

Припустимо, що це ділення на три групи пов'язане з поділом даних матриць для перетворення за наявністю і типом перестановки в них.

Усі дані матриці належать до множини $Mn(R)$ усіх квадратних дійсних матриць порядку n із бінарними діями додавання, множення, унарними – взяття протилежної матриці, транспонування і 0-арними – виділеними нульовою матрицею 0 та одиничною матрицею E , де $n = 2$ [5].

Розглянемо групу матриць для перетворення, що належать до повного симетричного

криптоперетворення (M_1^k, M_4^k). Матриці для перетворення складаються з множини M , із заданим на ній певним набором алгебраїчних дій (ωi), $i \in I$ (можливо, різної арності), а набір $\{\omega i \mid i \in I\}$ – її типом. Зазвичай позначається M ; $(\omega i) i \in I$ [5].

Припустимо, M_1^k є базовою матрицею, тоді дана матриця є матрицею з 0-арними діями (0-арна дія – це просто виділення певного елемента, наприклад, 0 або 1 у полі, в нашому випадку x_1 та x_2):

$$M_1^k = F_{3,5}^k = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \{x_1, x_2\}.$$

Тоді матриця M_4^k буде матрицею з діями арності 1, унарною матрицею – взяття протилежної матриці, оскільки в даній матриці реалізована базова перестановка – взяття протилежної матриці:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}.$$

Дії арності 1 (їх ще називають унарними) трапляються досить часто, наприклад, взяття протилежного або оберненого елемента, взяття цілої або дробової частини числа, перехід до транспонованої матриці чи до спряженого числа. Дії арності ≥ 3 трапляються рідко [5].

Розглянемо групу матриць для перетворення, що належать до частково несиметричного криптоперетворення (M_2^k, M_3^k). В основі даних матриць є базова матриця з 0-арними діями. Оскільки $x_1 + x_2 = x_2 + x_1$, то додавання до базової матриці x_1 назовемо лівою підстановкою, а додавання до базової матриці x_2 – правою підстановкою. Звідси легко бачи-

ти, що матриця M_2^k буде базовою матрицею з правою підстановкою, а M_3^k , відповідно, – базовою матрицею з лівою підстановкою.

Розглянемо групу матриць для перетворення, що належать до повного несиметричного криптоперетворення (M_5^k, M_6^k) . В основі даних матриць є унарна матриця. За аналогією до групи матриць для перетворення, що належать до частково несиметричного криптоперетворення, матриця M_5^k буде унарною матрицею з правою підстановкою, а M_6^k , відповідно, – унарною базовою матрицею з лівою підстановкою.

Більш детально зупинимося на операціях, що використовуються в матричних моделях операцій криптографічного перетворення. Нехай операція криптоперетворення $O_1^\oplus$ буде операцією з базовим розміщенням елементів $x_i, y_i, i \in \{1, 2\}$, оскільки розміщення x_i збігається з розміщенням у базовій матриці для перетворення. Тоді $O_2^\oplus$ буде операцією з базовим розміщенням x_i і перестановкою y_i , $O_3^\oplus$ – буде операцією з перестановкою x_i і

базовим розміщенням y_i , а $O_4^\oplus$ – операцією з перестановкою як x_i , так і y_i .

Враховуючи вищевикладене, побудуємо цикли для здійснення криптоперетворення на базі матричних моделей операцій криптографічного перетворення $O_i^\oplus M_j^k$.

Для M_2^k операція криптоперетворення $O_3^\oplus$, операція з перестановкою x_i , розкодовується операцією $O_4^\oplus$, а операція криптоперетворення $O_4^\oplus$, навпаки, розкодовується операцією $O_3^\oplus$, тобто для M_2^k маємо подвійний цикл криптоперетворення (рис. 1):

$$M_2^k O_3^\oplus \rightarrow M_2^k O_4^\oplus \rightarrow M_2^k O_3^\oplus.$$

Аналогічно для M_3^k операція криптоперетворення $O_2^\oplus$, операція з перестановкою y_i , розкодовується операцією $O_4^\oplus$, а операція криптоперетворення $O_4^\oplus$, навпаки, розкодовується операцією $O_2^\oplus$, тобто для M_3^k маємо подвійний цикл криптоперетворення (рис. 2).

$$M_3^k O_2^\oplus \rightarrow M_3^k O_4^\oplus \rightarrow M_3^k O_2^\oplus.$$

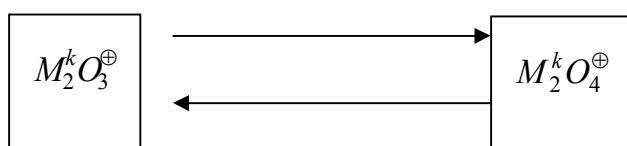


Рис. 1. Подвійний цикл криптоперетворення для матриці M_2^k

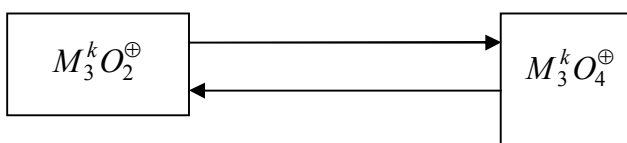


Рис. 2. Подвійний цикл криптоперетворення для матриці M_3^k

Можемо відзначити, що для обох матриць даної групи спільною частиною циклу також буде операція $O_4^\oplus$, операція з перестановкою як x_i , так і y_i .

Для M_5^k операція криптоперетворення $O_2^\oplus$, операція з перестановкою y_i , розкодо-

вується операцією $O_3^\oplus$, операцією з перестановкою x_i , а операція криптоперетворення $O_3^\oplus$ розкодовується операцією $O_4^\oplus$, яка, в свою чергу, розкодовується операцією $O_2^\oplus$, тобто для M_5^k маємо, на відміну від подвій-

ного циклу, в групі з матриць для перетворення, що належать до частково несиметричного криптоперетворення, потрібний цикл криптоперетворення (рис. 3):

$$M_5^k O_2^{\oplus} \rightarrow M_5^k O_3^{\oplus} \rightarrow M_5^k O_4^{\oplus} \rightarrow M_5^k O_2^{\oplus}.$$

Аналогічно, для M_6^k операція криптоперетворення $O_2^{\oplus}$, операція з перестановкою y_i , розкодовується операцією $O_4^{\oplus}$, а операція

криптоперетворення $O_4^{\oplus}$ розкодовується операцією $O_3^{\oplus}$, операцією з перестановкою x_i , яка, в свою чергу, розкодовується операцією $O_2^{\oplus}$, тобто для M_6^k також маємо аналогічно до M_5^k потрібний цикл криптоперетворення (рис. 4):

$$M_6^k O_2^{\oplus} \rightarrow M_6^k O_4^{\oplus} \rightarrow M_6^k O_3^{\oplus} \rightarrow M_6^k O_2^{\oplus}.$$

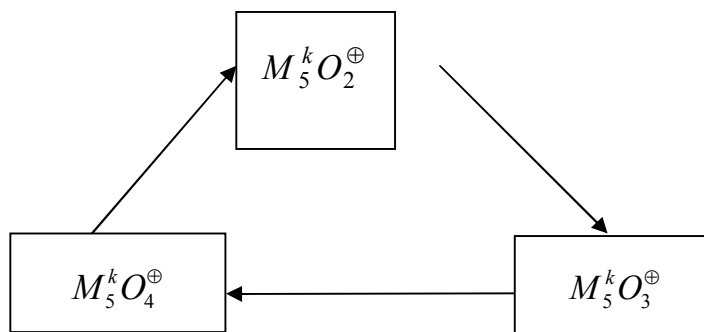


Рис. 3. Потрібний цикл криптоперетворення для матриці M_5^k

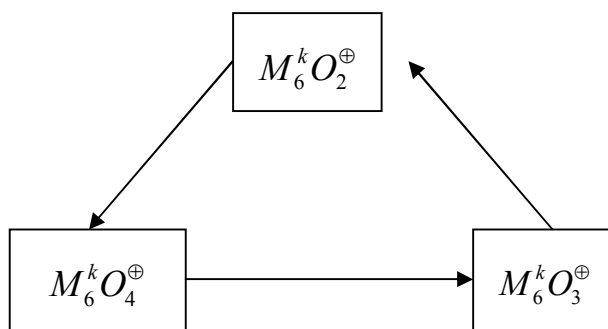


Рис. 4. Потрібний цикл криптоперетворення для матриці M_6^k

Крім того, цикл криптоперетворень для M_6^k буде оберненим до циклу криптоперетворень для M_5^k . Це пояснюється тим, що і для розшифрування криптоперетворення матриці M_5^k буде матриця M_6^k , і для розшифрування криптоперетворення матриці M_6^k – матриця M_5^k , тому що $M_5^d = M_6^k$, а $M_6^d = M_5^k$.

Наведені цикли дозволяють будувати операції прямого та оберненого криптоперетворення в групі дворозрядних матричних операцій з використанням запропонованих двооперандних операцій.

Висновки. За результатами проведеного обчислювального експерименту здійснено поділ матричних моделей криптоперетворення на три групи за наявністю та типом перестановки в них.

У ході аналізу одержаних результатів експерименту виявлено, що взаємозв'язки між операціями, що застосовуються для криптографічного перетворення на основі матричних моделей, характеризуються циклічністю.

Отримані цикли послідовності застосування операцій дозволяють будувати операції прямого та оберненого криптоперетворення в групі дворозрядних матричних операцій з використанням запропонованих двооперандних операцій.

Список літератури

1. Бабенко В. Г. Синтез і аналіз операцій криптографічного додавання за модулем два / В. Г. Бабенко, Н. В. Лада // Системи обробки інформації : зб. наук. праць. – Вип. 2 (118). – Х. : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. – С. 116–118.
2. Бабенко В. Г. Дослідження матричних операцій криптографічного перетворення на основі арифметичних операцій за модулем / В. Г. Бабенко // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. праць. – Вип. 4 (24). – К., 2012. – С. 85–88.
3. Голуб С. В. Метод синтезу операцій криптографічного перетворення на основі додавання за модулем два / С. В. Голуб, В. Г. Бабенко, С. В. Рудницький // Системи обробки інформації : зб. наук. праць. – Вип. 3 (101), т. 1. – Х. : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 119–122.
4. Криптографическое кодирование : [кол. монография] / под ред. В. Н. Рудницкого, В. Я. Мильчевича. – Х. : Щедрая усадьба плюс, 2014. – 240 с.
5. Ганюшкін О. Г. Теорія груп : навч. посіб. для студ. мех.-мат. факультету / О. Г. Ганюшкін, О. О. Безущак. – К. : Ви-

дав.-поліграф. центр «Київський університет», 2005. – 123 с.

References

1. Babenko, V. G. and Lada, N. V. (2014). Synthesis and analysis of cryptographic addition operations modulo two. *Systemy obrobky informaciyi*, 2 (118), pp. 116–118 [in Ukrainian].
2. Babenko, V. G. (2012). The research of matrix operations of cryptographic transformation based on arithmetic modulo. *Systemy upravlinnya, navigatsiyi ta zvyazku*, 4 (24), pp. 85–88 [in Ukrainian].
3. Golub, S. V., Babenko, V. G. and Rudnytsky, S. V. (2012). The method of synthesis of cryptographic transformation operations based on addition modulo two. *Systemy obrobky informaciyi*, 3 (101), vol. 1, pp. 119–122 [in Ukrainian].
4. Rudnicki, V. N. and Milchevich, V. Ya (eds.) (2014) The cryptographic coding: collective monograph. Kharkov : Schedraya usadba plus, 240 p. [in Russian].
5. Ganyushkin, O. G. and Bezuschak, O. O. (2005) Groups theory: manual for students of mechanics and mathematics faculty. Kyiv: Vydav.-poligraf. tsentr "Kyivskyy universytet", 123 p. [in Ukrainian].

V. G. Babenko¹, Ph.D., associate professor,
associate professor of information security and computer engineering chair

e-mail: zolot_verba@rambler.ru

N. V. Lada¹, postgraduate student,

e-mail: LadaHatali256@gmail.com

S. V. Lada², postgraduate student

e-mail: raphaello1986@gmail.com

¹Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

Shevchenko blvd, 81, Cherkasy, Ukraine

RESEARCH OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE OPERATIONS IN MATRIX MODELS OF CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION

Introduction. Data encryption is based on the sequence of cryptographic transformation operations. To decrypt the encrypted data it is necessary to know the sequence of operations for information decrypting. Therefore, an increase in the number of operations suitable for cryptographic transformation of information would allow to build data protection algorithms with better cryptographic properties.

The purpose of scientific work. The objective of this research is to identify the relationships between operations in matrix models of direct and reverse cryptographic transformation.

Formulation of the problem. In modern printed editions special attention is given to the use of matrix operations of cryptographic transformation and cryptographic primitives, based on them, for the algorithms of information resources protection. However, in these studies, the analysis of the relationships in matrix operations of cryptographic transformation has not been done to implement the encoding and decoding of information.

The main material. The article presents the results of the research on the use of the operations of addition modulo two and permutations to implement matrix operations of cryptographic transformation. According to the results of computational experiment the division of matrix models of cryptographic transformation into three groups according to the presence and type of permutation in them: full symmetric cryptographic transformation, the sequences of encryption and decryption operations in which are the same for the whole group; partially asymmetric cryptographic transformation, where the sequences of encryption and decryption operations are not the same; conditional full asymmetric cryptographic transformation, in some models, apart from changing the operation, changing matrix decryption, is carried out.

During the analysis of the results of the experiment it is revealed that the relationships between the operations, which are used for cryptographic transformation based on matrix models, are characterized by cycles.

Conclusions. The received cycles of the sequences of operations allow to build direct and reverse cryptographic transformation in a group of two-digit matrix operations using the proposed two-operand operations.

Keywords: cryptographic transformation, operation, matrix model, relationships, direct and reverse transformation, permutation, group, cycle, symmetric and asymmetric transformation, encryption, decryption, basic matrix, left and right substitution.

Рецензенти: С. В. Голуб, д.т.н., професор,
В. М. Рудницький, д.т.н., професор

С. А. Положаенко, д.т.н., профессор,

e-mail: polozhaenko@mail.ru

Х. М. Мухиалдин, аспирант

hassan_mohammed88@yahoo.com

Одесский национальный политехнический университет

просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕОЛОГИИ ФРАКТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ

Исследовано условие «гладкости» фронта раздела составляющих многокомпонентных (гетерогенных) систем на основании анализа «скачка» насыщенности в функции Баклея-Леверетта. Показано, что «скачок» насыщенности отсутствует, а фронт раздела продвигается устойчиво и сохраняет «гладкость», если подвижность вытесняющей компоненты не превышает подвижность вытесняемой. Также показано, что нарушение «гладкости» фронта раздела приводит к фрактально-неоднородной структуре процесса реологии. Получены численные значения фрактальной размерности фронта раздела для реологического процесса, развивающегося в реальных геологических условиях. Предложена математическая модель фрактально-неоднородной многокомпонентной (гетерогенной) системы в классе вариационных неравенств.

Ключевые слова: многокомпонентная система, гетерогенная система, процесс реологии, фрактально-неоднородная структура, фрактальный кластер, математическая модель, вариационное неравенство.

Введение. В последние годы появился ряд работ (например, [1]), в которых исследуются вопросы ранее не изученного влияния процесса образования фрактальных структур на фильтрацию внутрипластовых жидкостей. Это влияние может осуществляться за счет *фрактальной структуры* пористой среды [2] или самой системы фильтрующихся жидкостей, имеющих *гетерогенный характер* [3]. В работе [2] утверждается, что переход от линейного закона фильтрации к нелинейному в большой степени зависит от распределения пор по размерам или фрактальности структуры пористой среды (или, иными словами, самоподобия структуры пористой среды, сохраняющегося в случае изменения геометрических размеров ее пор). Вместе с тем в [3] показано, что гетерогенные жидкости, в частности, эмульсии и системы многофазных несмешивающихся жидкостей, обладают динамической фрактальной структурой, которая определяется взаимодействием между частицами дисперсной фазы.

Учитывая вышесказанное, практически важным является определение фрактальных характеристик грунтов пористой среды и их влияние на фильтрацию пластовых жидкостей. Имеется ряд работ по эксперименталь-

ному определению фрактальной размерности пористых сред. В частности, в работе [4] методом сканирующей электронной микроскопии определена пространственная фрактальная размерность реального образца пористой среды, в [5] впервые предложен метод определения фрактальной размерности по экспериментальной изотерме адсорбции газа, который (метод) нашел своё развитие в работах [6, 7]. В работах [8, 9] предложены косвенные способы определения фрактальных характеристик пласта по кривым восстановления давления [8] и реакции пластовой системы на мгновенное изменение давления [9].

Однако в приведенных работах фрактальные свойства пористой среды и их влияние на фильтрационные процессы внутрипластовых жидкостей исследовались на основе натурных экспериментов. Это затруднительно в практической реализации, поскольку требует проведения экспериментов в условиях реальной пластовой системы (или ее физического воспроизведения при лабораторных исследованиях), специального оборудования и значительных ресурсных затрат.

Представляется перспективным, с точки зрения временных и ресурсных затрат, использовать средства математического моделирова-

ния для исследования фрактальных геологических структур и реологии (фильтрации в пористой среде) фрактально-неоднородных гетерогенных пластовых систем. Важным этапом проведения математического моделирования для указанных задач является формирование адекватной математической модели (ММ) исследуемых процессов. В ряде работ, например [10–12], выполнена попытка формализации реологии в пористых средах для случая фрактальной структуры последней, однако приведенные модели получены для идеального лотка Хелле-Шоу и имеют исключительно теоретическое значение. При этом следует отметить, что к настоящему моменту в литературе не выявлено ММ, описывающих реологические процессы для фильтрующихся гетерогенных (в том числе и многофазных) систем и обеспечивающих решение практических задач в условиях реальных фрактально-неоднородных пластовых структур.

Цель работы – разработка ММ реологии во фрактально-неоднородных пористых средах гетерогенных многофазных систем.

Основная часть. Важным фактом физической картины реологии многофазных, в частности, гетерогенных систем во фрактально-неоднородных средах является то [3], что при уменьшении взаимодействия между частицами, вследствие снижения концентрации дисперсной фазы, фрактальная структура фильтрующейся системы исчезает. Иными словами, можно утверждать, что, в данном случае, процесс реологии носит *выраженный направленный характер*.

Как показано в ряде работ, например [13], адекватным математическим описанием реологических процессов в пластовых пористых средах с выраженной направленностью развития процесса являются вариационные неравенства. Исходя из этого, в дальнейшем будем разрабатывать ММ процесса реологии во фрактально-неоднородных пористых средах в классе вариационных неравенств в частных производных.

1. Качественное описание процесса реологии многокомпонентной (гетерогенной) системы в пористой среде. Для фильтрующихся многофазных жидкостей (систем) важным аспектом при моделировании динамики является определение *фронта раздела* между отдельными компонентами. Данная задача может иметь и самостоятельное прикладное

значение, например, когда исследуется процесс вытеснения одной жидкостью другой.

Предположение о «гладкости» фронта раздела компонент в фильтрующейся многофазной (а также гетерогенной) системе возможно лишь в случае «близости» физико-химических свойств этих компонент (или мелкодисперсности и низкой концентрации гетерогенной системы). В противном случае «гладкость» фронта нарушается, а фильтрующийся поток приобретает фрактально-неоднородную структуру со «сложным» фронтом раздела фаз. Ещё более сложную картину реологии приобретает случай, когда с границей Γ области моделирования Ω контактируют разные компоненты многофазной (или гетерогенной) системы.

В пластовой гидрогазодинамике условием, определяющим границу раздела двух (для простоты дальнейшего рассмотрения) фильтрующихся компонент многофазного или гетерогенного потока, может служить «скачок» насыщенности в функции Баклея-Леверетта [14–16]

$$J(S) = \frac{k_1^0(S_1)}{\mu_1 k_1^0(S_1) + \mu_2 k_2^0(S_2)}, \quad (1)$$

где $k_1^0(S_1)$ и $k_2^0(S_2)$ – относительные фазовые проницаемости фильтрующихся компонент; μ_1 и μ_2 – их вязкости; S_1 и S_2 – насыщенности порового пространства фильтрующимися компонентами, соответственно.

Физически «скачок» насыщенности обусловлен наличием у одной из компонент многофазной системы напряжения сдвига τ , превышающего предельное значение ($\tau > \tau^*$). В литературе данная компонента получила название «вытесняющей» [13–16]. Экспериментально установлено [14], что фронт раздела фильтрующихся компонент многофазной системы продвигается устойчиво (т.е. фрактально-неоднородная структура процесса реологии отсутствует), если подвижность вытесняющей компоненты не превышает подвижность вытесняемой компоненты

$$\frac{k_1(S_1)}{\mu_1} \leq \frac{k_2(S_2)}{\mu_2}. \quad (2)$$

Данный случай реологии двухкомпонентной системы (т.е. с «гладкой» границей раздела) иллюстрирует рис. 1, а, на котором представлена динамика процесса фильтрации

водонефтяной смеси (вода – вытесняющая компонента, занимающая светлую область; нефть – вытесняемая компонента, занимающая темную область) между двумя эксплуатационными скважинами (обозначены на рисунке черными точками).

На практике более удобно пользоваться выражением, полученным из (2), делением последнего на усредненную скорость фильтрации ϖ

$$\frac{\partial P(t, z)}{\partial \eta} > 0, \quad \frac{\partial P_c(S)}{\partial \eta} > 0, \quad (3)$$

где $P(t, z)$ задает внутрипластовое (усредненное) давление для фильтрующихся компонент многофазной системы; $P_c(S)$ – капиллярное давление, обусловленное наличием различных скоростей фильтрации для компонент в многокомпонентной системе; η – нормаль к градиенту внутрипластового давления $P(t, z)$ на границе Γ .

В противном случае скорость фильтрации вытесняемой компоненты ϖ_2 выше скорости изменения насыщенности вытесняющей компоненты, что приводит к образованию фрактально-неоднородной структуры процесса реологии, т.е. существенному нарушению «гладкости» фронта раздела (рис. 1, б, в). При этом физическая картина реологического процесса характеризуется появлением «пальцев» вытесняющей компоненты (рис. 1, г, д). В предельном случае в фильтрующемся потоке возможно даже образование «застойных зон» [13, 14], представляющих собой участки вытесняемой компоненты с нулевой скоростью фильтрации $\varpi_2 = 0$ (рис. 1, е, ж, з). Иными словами, вытесняемая компонента «отстывает» медленнее, чем продвигается вытесняющая компонента, что физически и определяет механизм образования фрактально-неоднородной структуры и, как следствие, «застойных зон».

Предположим, что в момент времени $t = 0$ поверхность фронта раздела представляет собой плоскость $F(z_i) = \Xi_0, i = 1, 2$. Нарушение устойчивости фронта раздела учтем в виде нестационарных возмущений, нарушающих постоянство насыщенностей компонент S_j многофазной системы ($j = 2$ – для двухфазного случая) в областях распространения фронта и искажающих его «гладкость», что отразится следующим образом:

$$F(z_i, t) = \Xi_0(t); i = 1, 2, \quad (4)$$

где z_i соответствуют координатам в невозмущенной плоскости фронта раздела.

Выраженная направленность развития рассматриваемого процесса реологии, о которой говорилось выше, свидетельствует об его отклонении от линейного закона Дарси [14–16] (т.е. о пропорциональной линейной зависимости скорости фильтрации ϖ от градиента внутрипластового давления $grad(P)$) и о возможном наличии предельного градиента G , обуславливающего ненулевую скорость продвижения фронта раздела. Формализовано данное предположение представим следующим образом (для двухкомпонентного потока, $j = 1, 2$)

$$\varpi_j = -\frac{k_j(S_j)}{\mu_j} \left[grad(P_j) - \frac{G_j}{|grad(P_j)|} \right];$$

$$|grad(P_j)| > G_j, \quad \varpi_j = 0;$$

$$|grad(P_j)| \leq G_j; \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

Уравнения динамики вида (5) дополним уравнениями неразрывности (случай двух компонент в многофазной системе)

$$div(\varpi_j) - (-1)^j m \frac{\partial S_j}{\partial t} = 0; \quad j = 1, 2. \quad (6)$$

Граничные условия (ГУ) на возмущенной поверхности фронта раздела компонент (4), выражающие равенство давлений перед и за фронтом раздела, а также расходов

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \eta} = m \bar{\varpi} (S_1^h - S_1^f); \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \eta} = m \bar{\varpi} (S_2^h - S_2^f),$$

определены на невозмущенной поверхности фронта вытеснения Ξ_0 .

Очевидно, что для «гладкости» границы раздела требуется ограниченность возмущений на поверхности Ξ_0 . Тогда для определения возмущений скоростей, давлений и насыщенностей получим следующие выражения (в приведенных ниже выражениях возмущения соответствующих величин обозначены знаком тильда, а невозмущенные величины обозначены индексом 0):

$$\varpi_j = -\frac{k_j(S_j)}{\mu_j} J_0(S_j) \left[grad(\tilde{P}_j) - \frac{G_j}{|grad(\tilde{P}_j)|} \right];$$

$$\begin{aligned} |\operatorname{grad}(\tilde{P}_j)| &> G_j, \quad \varpi_j = 0; \\ |\operatorname{grad}(\tilde{P}_j)| &\leq G_j; \quad j=1,2, \end{aligned} \quad (7)$$

с ГУ, учитывающими ограниченные возмущения (или их отсутствие) на поверхности фронта $F(z_i) = \Xi_0; i=1,2$

$$\frac{\partial \tilde{P}(t, z_i)}{\partial \eta} > 0, \quad \frac{\partial \tilde{P}_c(S)}{\partial \eta} > 0; \quad i=1,2, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}_j}{\partial \eta} = m \overline{\varpi} (S_j^h - S_j^f); \quad j=1,2. \quad (9)$$

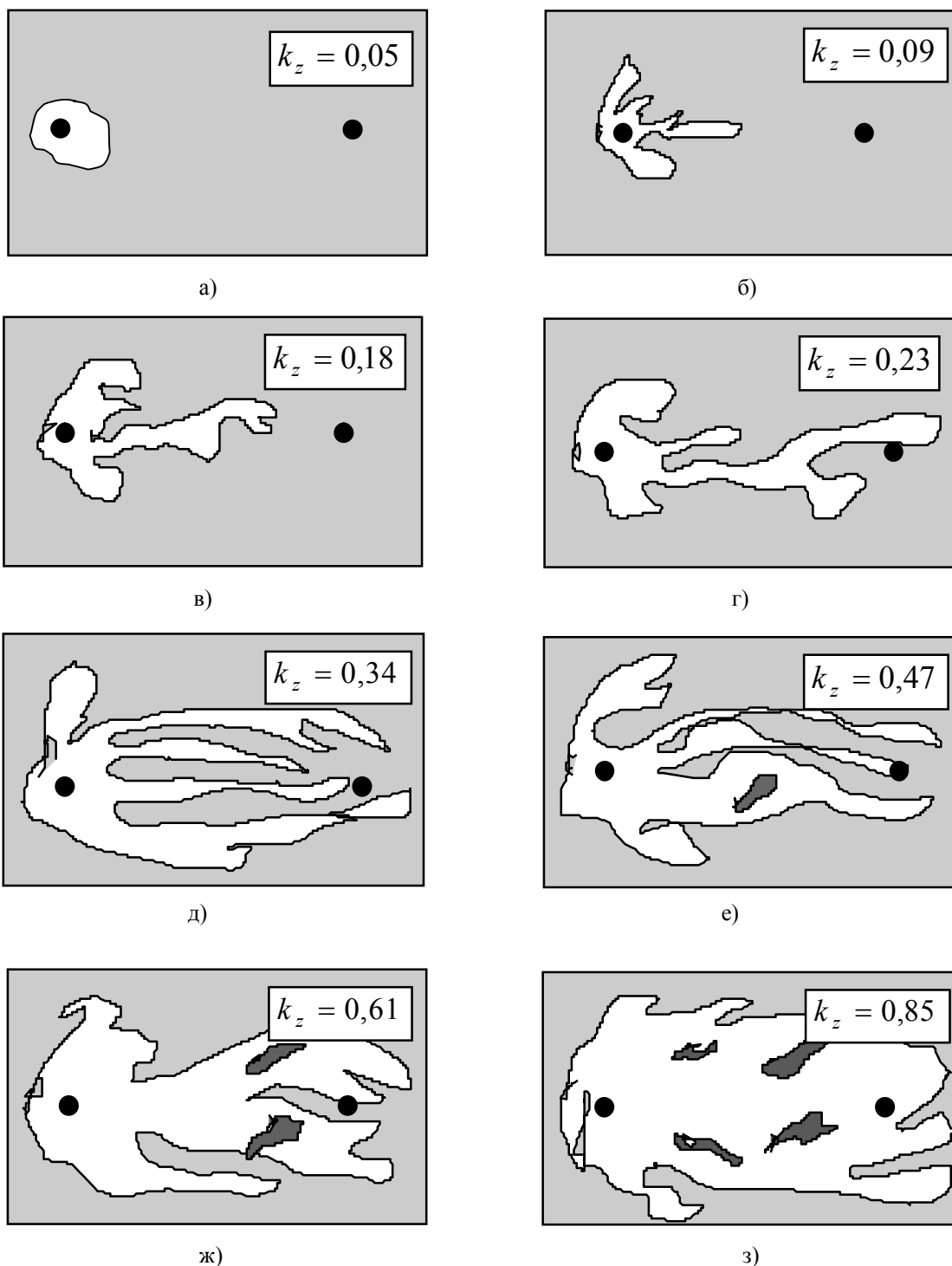


Рис. 1. Картина реологии двухкомпонентной системы на примере водонефтяной смеси при различных значениях пропускной способности k_z пористой среды

Таким образом, формулировка задачи об устойчивости фронта раздела компонент многофазной системы фактически сводится к определению возмущений насыщенности («скачку» насыщенности) из системы (7) с ГУ (8), (9).

Однако возникновение фрактально-неоднородной структуры процесса реологии свидетельствует о значительных возмущениях фронта раздела компонент многофазной системы, что, формализовано, должно быть отражено в граничных условиях, поскольку последние определяют геометрию фронта раздела. В соответствии с одним из свойств, составляющих основу определения фрактальных систем, фрактальная структура представляет собой систему с *дробной размерностью* (именуемой в литературе, например [1, 3, 10, 11], *фрактальной размерностью*), геометрически объединяющая *фрактальные кластеры* (или *агрегаты*). При этом фрактальный кластер представляет собой совокупность достаточно большого числа элементов, которые внутри данной совокупности сохраняют свою индивидуальность [3, 10, 11]. С точки зрения реологии многокомпонентных систем, под фрактальным кластером будем понимать совокупность «пальцев» вытесняющей компоненты на фронте раздела (рис. 1, г, д).

Если выполнить аппроксимацию фронта раздела в пределах одного «пальца» ломаной линией, то ее длину можно представить в следующем виде:

$$L = a(R/a)^D, \quad (10)$$

где L – линейный размер «пальца» вытесняющей компоненты (по прямой); a – размер звена ломаной линии (усреднённый размер «зерна» порового пространства); R – размер фрактального кластера (радиус сферы, охватывающий «палец»); D – фрактальная размерность, обеспечивающая для кластера определенную область масштабов, в которой выполняется аппроксимация вида (10).

Разрешая (10) относительно фрактальной размерности D , получим

$$D = [\ln(L) - \ln(a)] / [\ln(R) - \ln(a)]. \quad (11)$$

Учитывая реальные (усреднённые) геологические значения параметров [8, 14], входящих в (10), и подставляя их в (11), можно оценить величину фрактальной размерности для пористых сред, в которых осуществляется

реология многокомпонентных (или гетерогенных) систем

$$D = [\ln(100) - \ln(0,1)] / [\ln(50) - \ln(0,1)] = \\ = [4,605 - (-2,302)] / [3,912 - (-2,302)] = 1,112.$$

Далее, имея реологические фрактальные характеристики многокомпонентной (гетерогенной) системы при значительных возмущениях фронта раздела компонент, можно получить *математическую модель* процесса реологии фрактально-неоднородной гетерогенной системы.

2. Формализация задачи реологии фрактально-неоднородной гетерогенной системы в виде вариационного неравенства.

Сформируем ММ процесса реологии фрактально-неоднородной системы, характеризующуюся нарушениями «гладкости» фронта раздела компонент. Запишем для плоского случая ($i = 2$) уравнения динамики вида (7) соответственно для вытесняемой компоненты ($j = 1$) и вытесняющей компоненты ($j = 2$) с учетом «скачка» насыщенности в функции Баклея-Леверетта и параметра пористости m среды, в которой реализуется реологический процесс

$$(-1)^j \frac{m \partial S_j}{\partial t} - \frac{k_j(S_j)}{\mu_j} J(S_j) \times \\ \times \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial z_i} \left[\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} - \frac{d\tilde{P}_c}{dS_j} - G_j \left(\left| \frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} \right|^{-1} \right) \right] \right\} = \frac{1}{h} Q_j, \quad (12)$$

где h – толщина реологического пласта (в литературе используется термин «мощность пласта», например, [13, 15, 16]).

Начальные и граничные условия примут вид

$$S_j(0, z) \Big|_{z \in \Omega} = S_{j_0}(z); \\ \tilde{P}(0, z) \Big|_{z \in \Omega} = \tilde{P}_0(z), \quad j = 1, 2 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \eta} \Big|_{L \in \Gamma} > 0; \quad \frac{\partial S_j}{\partial \eta} \Big|_{L \in \Gamma} > 0; \\ \frac{\partial P_c(S_j)}{\partial \eta} \Big|_{L \in \Gamma} > 0, \quad j = 1, 2. \quad (14)$$

Приведем ММ процесса реологии фрактально-неоднородной системы к вариационной форме (вариационному неравенству). С

этой целью введем в рассмотрение пробную функцию v_j , по физической природе аналогичную функциям насыщенности $S_j(t, z)$, $j = 1, 2$, и определенную на множестве K : $\forall v \in K, K = \{v | v \geq 0 \text{ п.в. в } \Omega\}$. Скалярно умножим уравнения системы (12) соответственно на $(v - S_1)$ и $(v - S_2)$. Далее, применив к преобразованным таким образом уравнениям (12) функцию Грина, получим

$$\begin{aligned} & \left[(-1)^j \frac{m \partial S_j}{\partial t}, (v - S_j) \right] - \int_{\Omega} \frac{k_j(S_j)}{\mu_j} J(S_j) \times \\ & \times \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} \left[\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} - \frac{d\tilde{P}_c}{dS_j} \frac{\partial S_j}{\partial z_i} - G_j \left(\left[\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} \right]^{-1} \right) \right] \times \right. \\ & \left. \frac{\partial (v - S_j)}{\partial z_i} \right\} dz = \frac{1}{h} Q_j, (v - S_j) + \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial S_j}{\partial \eta}, (v - S_j) \right] d\Gamma, \\ & \forall v, S_j \in K, j = 1, 2. \end{aligned} \quad (15)$$

Определим билинейную форму

$$\begin{aligned} & a[\tilde{P}, (v - S_j)] = \\ & = \int_{\Omega} \left[\frac{k_j(S_j)}{\mu_j} J(S_j) \sum_{i=1}^2 \frac{d\tilde{P}_c}{dS_j} \frac{\partial S_j}{\partial z_i} \frac{\partial (v - S_j)}{\partial z_i} \right] dz \end{aligned} \quad (16)$$

и функционалы

$$\begin{aligned} & \mathbf{j}(v) = \\ & = \int_{\Omega} \left[\frac{k_j(v_j)}{\mu_j} J(v_j) \sum_{i=1}^2 \frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial z_i^2} - G_j \left(\left[\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} \right]^{-1} \right) \right] dz, \end{aligned} \quad (17)$$

$\mathbf{j}(S) =$

$$= \int_{\Omega} \left[\frac{k_j(S_j)}{\mu_j} J(S_j) \sum_{i=1}^2 \frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial z_i^2} - G_j \left(\left[\frac{\partial \tilde{P}}{\partial z_i} \right]^{-1} \right) \right] dz. \quad (18)$$

Тогда, в результате очевидных преобразований приходим к следующей системе вариационных неравенств:

$$\begin{aligned} & S_j \in K : \left[(-1)^j \frac{m \partial S_j}{\partial t}, (v - S_j) \right] - a[\tilde{P}, (v - S_j)] - \\ & - \mathbf{j}(v_j) + \mathbf{j}(S_j) \geq \left[\frac{1}{h} Q_j, (v - S_j) \right], \quad \forall v_j \in K. \end{aligned} \quad (19)$$

Полученная система вариационных неравенств вида (19) дополняется начальными (13) и граничными (14) условиями.

Вывод. Выполнены качественное описание процесса реологии многокомпонентной (гетерогенной) системы в пористой среде, а также формализация задачи реологии фрактально-неоднородной гетерогенной системы в виде вариационного неравенства, что позволило получить адекватную математическую модель исследуемого процесса. Модель получена на основании гипотезы о фрактально-неоднородной структуре реологического процесса, для которого определены числовые значения основных характеристик, в частности, фрактальной размерности. Последняя позволяет оценить степень «негладкости» границы раздела составляющих многокомпонентной (или гетерогенной) системы в реологическом процессе.

Список литературы

1. Мандельбот Б. Фрактальная геометрия природы. – М.-Ижевск : ИКИ, 2002. – 656 с.
2. Фракталы и перколяция в пористой среде / Э. Гийон, К. Д. Минтеску, Ж. П. Юлен, С. Ру // Успехи физических наук. – 1991. – Т. 161, № 10. – С. 121–128.
3. Зосимов В. В. Динамическая фрактальная структура эмульсий, обусловленная движением и взаимодействием частиц. Численная модель / В. В. Зосимов, Д. Н. Тарасов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1997. – Т. 111, вып. 4. – С. 1314–1319.
4. Katz A. J. Fractal sandstone pores: implications between for conductivity and pore formation / A. J. Katz, A. H. Thompson // Physical Review Letters. – 1985. – V. 54. – P. 1325–1332.
5. Avnir D. Chemistry in non-integer dimensions between two and three. Fractal surfaces of absorbents / D. Avnir, D. Farin, P. Pfeifer // The Journal of Chemical Physics. – 1983. – V. 79, № 7. – P. 3566–3571.
6. Неймарк А. В. Термодинамический метод расчета поверхностной фрактальной размерности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1990. – Т. 51, вып. 10. – С. 535–538.
7. Черкашин Г. Ю. Оценка фрактальной размерности дисперсных систем на основании уравнения, описывающего адсорбцию в микропорах / Г. Ю. Черкашин,

- В. А. Дроздов // Журнал физической химии. – 1998. – Т. 72, № 1. – С. 88–92.
8. Сулейманов Б. А. Особенности фильтрации гетерогенных систем. – М.-Ижевск : ИКИ, 2006. – 354 с.
9. Chang J. Pressure-transient analysis of fractal reservoir / J. Chang, Y. C. Yortsos // SPE Formation Evaluation. – 1990, March. – SPE 18170. – P. 31–38.
10. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
11. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров / Б. М. Смирнов. – М. : Наука, 1991. – 133 с.
12. Moulu J. C. A new model for three-phase relative permeability's based on a fractal representation of the porous media / J. C. Moulu, O. Vizika, F. Kalandjian // SPE Formation Evaluation. – 1997, August. – SPE 38891. – P. 147–158.
13. Верлань А. Ф. Математическое моделирование аномальных диффузионных процессов / А. Ф. Верлань, С. А. Положаенко, Н. Г. Сербов. – К. : Наука, 2011. – 416 с.
14. Бернадинер М. Г. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей / М. Г. Бернадинер, В. М. Ентов. – М. : Наука, 1975. – 199 с.
15. Азиз Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. – М. : Недра, 1982. – 406 с.
16. Кричлоу Генри Б. Современная разработка нефтяных месторождений. – М. : Недра, 1979. – 302 с.
4. Katz, A. J. and Thompson, A. H. (1985). Fractal sandstone pores: implications between for conductivity and pore formation. *Physical Review Letters*, (54), pp. 1325–1332.
5. Avnir, D., Farin, D. and Pfeifer, F (1983) Chemistry in non-integer dimensions between two and three. Fractal surfaces of absorbents. *The Journal of Chemical Physics*, 79 (7), pp. 3566–3571.
6. Neumark, A. V. (1990) Thermodynamic method for calculating surface fractal dimension. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 51 (10), pp. 535–538 [in Russian].
7. Cherkashinin, G. Yu. and Drozdov, V. A. (1998). Estimation of fractal dimension of dispersed systems based on the equation that describes the adsorption in microspores. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 72 (1), pp 88–92 [in Russian].
8. Suleimanov, B. A. (2006) Features of heterogeneous systems filtration. Moscow-Izhevsk : IKI, 354 p. [in Russian].
9. Chang, J. and Yortsos, Y. C. (1990) Pressure-transient analysis of fractal reservoir. *SPE Formation Evaluation*, SPE 18170, pp. 31–38.
10. Feder, E. (1991) Fractals. Moscow: Mir, 254 p. [in Russian].
11. Smirnov, B. M. (1991) Physics of fractal clusters. Moscow : Nauka, 133 p. [in Russian].
12. Moulu, J. C., Vizika, O. and Kalandjian, F. (1997) A new model for three-phase relative permeability's based on a fractal representation of the porous media. *SPE Formation Evaluation*, SPE 38891, pp. 147–158.
13. Verlan, A. F., Polozhaenko, S. A. and Serbo, N. G. (2011) Mathematical modeling of anomalous diffusion processes. Kyiv: Nauka, 416 p. [in Russian].
14. Bernadiner, M. G. and Entov, V. M. (1975). Hydrodynamic theory of abnormal liquids filtration. Moscow: Nauka, 199 p. [in Russian].
15. Aziz, H. and Settary, E. (1982) Mathematical modeling of reservoir systems. Moscow: Nedra, 406 p. [in Russian].
16. Critchlow, Henry B. (1979) Modern development of oil fields. Moscow : Nedra, 302 p. [in Russian].

References

1. Mandelbot, B. (2002) Fractal geometry of nature. Moscow-Izhevsk: IKI, 656 p. [in Russian].
2. Guyon, E., Mintesku, K. D., Julien, J. P. and Roux, S. (1991). Fractals and percolation in porous media. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 161 (10), pp. 121–128 [in Russian].
3. Zosimov, V. V. and Tarasov, D. N. (1997). Dynamic fractal structure of emulsions due to the movement and interaction of particles. Numerical model. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 111 (4), pp. 1314–1319 [in Russian].

S. A. Polozhaenko, *Dr.Tech.Sc., professor*,
e-mail: polozhaenko@mail.ru

H. M. Muhialdin, *postgraduate student*
e-mail: hassan_mohammed88@yahoo.com
Odessa National Polytechnic University
Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF RHEOLOGY OF FRACTAL-HETEROGENEOUS MULTICOMPONENT STRATAL SYSTEMS

Filtration processes within the reservoir fluids are highly dependent on biological characteristics of the "skeleton" of porous medium. Qualitative specificity thus has the shape of the boundary (front) of the filter flow, depending on which areas may be formed with a "zero" speed of filtration – "stagnant" zones.

One possible and efficient by examining complex filtration flows with substantial heterogeneity of their boundaries is the assumption of fractal structure of porous medium and heterogeneous structure of filtered liquid.

In this paper, in contrast to the available studies carried out on the basis of field experiments, mathematical model of the rheology of fractal heterogeneous porous media is considered. This gives the opportunity for multivariate experiments without a rigid peg to the characteristics of porous medium.

The condition of «smoothness» of the front of components division in multicomponent (heterogeneous) systems is investigated on the basis of the analysis of saturation «jump» in the function of Bacley-Leverett. It is shown that saturation «jump» is absent, and the front of division moves up steadily and saves «a smoothness», if the mobility of ousting component does not exceed the mobility of ousted one. It is also shown that the failure of «smoothness» of the front of division brings to fractal-heterogeneous structure of rheology process. The numeral values of fractal dimension of the front of division are got for rheology process, developing in real geological terms. Mathematical model of fractal-heterogeneous multicomponent system in the class of variation inequalities is offered.

Mathematical formalization of rheology process of multicomponent (heterogeneous) system in the form of variation inequalities allows to adequately describe the features of the test process, in particular, its one-sided ones.

Keywords: *multicomponent system, heterogeneous system, rheology process, fractal-heterogeneous structure, fractal cluster, mathematical model, variation inequality.*

Статтю представляє С. А. Положаєнко, д.т.н., професор, завідувач кафедри «Комп'ютеризовані системи управління», Одеський національний політехнічний університет.

М. П. Мусієнко, д.т.н., професор, декан факультету комп'ютерних наук,
e-mail: musienko2001@ukr.net

І. М. Журавська, к.т.н., доцент
Чорноморський державний університет ім. Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

АЛГОРИТМИ ПРОКЛАДАННЯ МАРШРУТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ХОПФІЛДА

В статті розглядаються моделі, методи і алгоритми прокладання маршруту безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропоновано застосовувати для вирішення поставлених завдань математичний апарат нейронних мереж Хопфілда (НМХ). Проведено моделювання поведінки БПЛА в середовищі MATLAB r2009b. Розроблено модифіковану модель структури НМХ (за рахунок введення додаткового модуля аналізу географічних координат) і математичну модель пошуку оптимального шляху БПЛА за принципом sudoku (за рахунок введення додаткових обмежень). Проведений експеримент показав адекватність і ефективність застосування запропонованого методу та розробленої моделі для формування маршрутів БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, прокладання маршруту, нейронна мережа Хопфілда, математичне моделювання, MATLAB.

Вступ. У сучасному суспільстві поширюється використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для перевезення людей і товарів, а також для виконання функцій моніторингу суспільно важливих об'єктів [1].

Велика кількість факторів, які впливають на вибір шляху пересування БПЛА, і велика кількість вимог, пов'язаних з державним регулюванням можливих шляхів пересування БПЛА, роблять цю проблему дуже складною [2, 3]. Отже, однією з головних задач є необхідність знайти оптимальне рішення, яке буде дешевим, але також буде виконувати велику кількість визначених умов. Недоліком є те, що складові критеріїв прийняття рішення можуть часто суперечити одна одній, тому виникає необхідність в їхньому балансуванні.

У цих умовах потрібно знайти маршрут, який буде задовольняти принципам оптимізації Парето, таким чином ми можемо отримати точне рішення. Фактори, що можуть вплинути на остаточне рішення про прокладання маршруту, дуже різноманітні і можуть варіюватися в конкретних випадках (структура рельєфу, метеоумови, наявність та зайнятість інших повітряних транспортних коридорів, економічні та соціальні аспекти і т. д.).

Через вплив великої кількості факторів, умов і вимог процес прийняття рішень доцільно виконувати за допомогою нейронної мережі.

Для формування просторових коридорів пересування БПЛА існує позитивний досвід використання нейронної мережі Хопфілда [4]. Через це було прийняте рішення дослідити можливості нейронної мережі Хопфілда (НМХ) для вибору оптимального маршруту БПЛА [5].

Аналіз сучасного стану проблеми та останніх досліджень. Основна проблема при транспортуванні полягає в тому, щоб знайти найкоротший шлях між двома точками (А і В). Математично кажучи, це евклідова відстань, яка є прямою лінією траєкторії (рис. 1, а). У реалістичних умовах зайняті транспортні коридори (або заборонені державним регулюванням для пересування БПЛА) вводять обмеження, і найкоротша відстань визначається мінімальною сумою індивідуальної довжини перетину з точки А в точку В (рис. 1, б). Розв'язок цієї проблеми визначається алгоритмом Дейкстри [6].

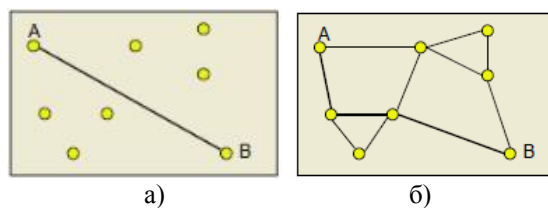


Рис. 1. Найкоротша відстань між точками А і В:
а) в ідеалі. б) у реалістичних умовах
інфраструктурної мережі

У разі, якщо знадобиться розробити новий шлях серед існуючої інфраструктури (тобто повітряних транспортних коридорів, що вже використовуються), необхідно проаналізувати всі фактори, які можуть на це вплинути. Навіть якщо існує тільки один фактор, який є реалістичним і просторово орієнтованим, відстань між двома точками повинна бути параметрично обґрунтованою. Це особливо важливо у випадку, коли спостерігаються фактори, що можуть набувати різних значень у різних просторових зонах (рис. 2).

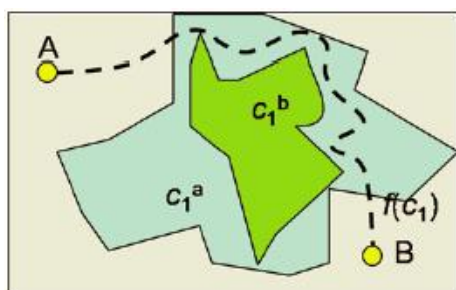


Рис. 2. Найкоротша можлива відстань між точками А і В, коли фактор має два можливі значення, C_1^a й C_1^b

Наприклад, якщо просторова зона C_1 розташована між точками А і В, з двома різними кількісними областями (C_1^a і C_1^b), то відстань між точками залежить від одиниці вартості будівництва через області C_1^a та C_1^b . Проблема вибору в цьому випадку залежить від співвідношення ціни та довжини. У разі, коли загальна вартість будівництва через C_1^b значно більша, ніж загальна вартість поза цією областю, оптимальним рішенням був би обхід навколо цієї області, що дозволило б зробити маршрут довшим, але безпечнішим чи дешевшим. Проблема вибору маршруту масштабується при аналізі великої кількості можливих факторів, особливо, коли кожний фактор може мати власні підрозділи (рис. 3).

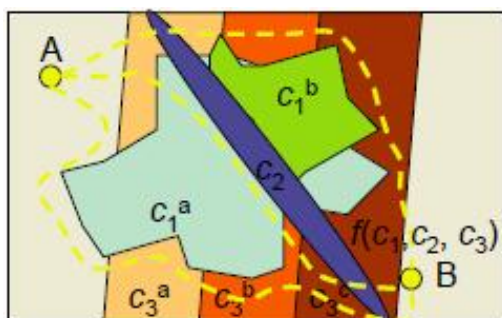


Рис. 3. Найкоротша можлива відстань між точками А і В

Найкоротша можлива відстань між точками А і В (рис. 3) в просторових зонах C_1 , C_2 та C_3 . C_1 має два можливі значення (C_1^a , C_1^b), C_2 – одне можливе значення, і C_3 має три можливі значення (C_3^a , C_3^b , C_3^c).

Запропонований Kojic та Reljin алгоритм прокладання оптимального шляху [7] складається з трьох етапів: моделювання рельєфу місцевості, управління (закладені умови, вимоги і параметри нейронної мережі) і обробка даних (схема зображена на рис. 4).

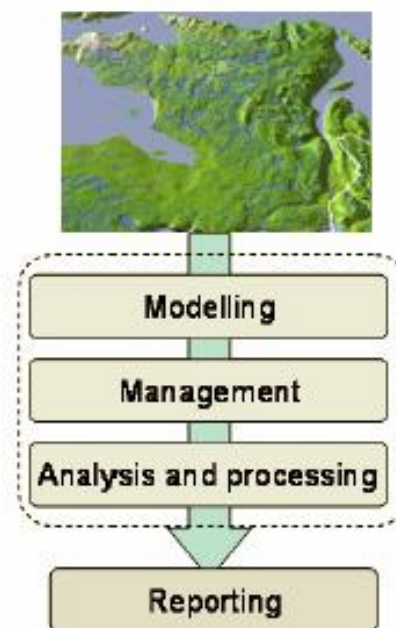


Рис. 4. Схема алгоритму, запропонованого Kojic та Reljin

Методика складання карти місцевості включає в себе розподілення віртуальної мережі по географічній карті регіону. Карта може бути розроблена з довільними розмірами квадрата форми $r \times r$. При виборі великих значень параметра r результуючі регіони мають менші розміри і рішення виходить більш точним. Така область є найменшою формою, з якою може працювати алгоритм, і розроблене рішення може бути використано для ряду регіонів та географічних ділянок, що пропонуються для прокладання шляху.

Управління включає в себе визначення всіх умов і вимог, обмежень та параметрів запропонованої нейронної мережі, що можуть вплинути на кінцевий результат, його точність, швидкість запропонованого алгоритму і т. д. Цей етап також включає визначення параметрів, необхідних для роботи алгоритму, і умов, передбачених у реальному середовищі.

Наприклад, ці обмеження можуть бути пов'язаними із детермінацією чіткої умови: чи може маршрут проходити через певне місто або район, чи більш ефективним рішенням буде обхід цієї географічної зони.

На етапі аналізу і обробки всі дані з попередніх двох фаз використовується для створення штучної нейронної мережі. Заради потреб цього алгоритму було розроблено чітко визначену, особливу логіку, що базується на НМХ. Завдання НМХ – обробка всіх даних і пропонування Парето-оптимального рішення, що враховує всі фактори, які подаються на вхід. Його мета полягає в тому, щоб отримати математичне представлення шуканого вирішення (маршруту), що оптимально підходить його графічній візуалізації. Рішення має надати оптимальний баланс усіх факторів, їх цінності, умови, вимоги і т. д. Подальшою задачею алгоритму є необхідність знайти оптимальне рішення для прокладання маршруту відносно географічної ділянки, що розглядається. Як результат, ця фаза дає на виході матрицю V розмірності $r \times r$, заповнену значеннями 0 або 1. Значення 1 вказує на те, що цю ділянку можна розглядати як точку маршруту, в той час як 0 вказує на протилежне. Залежно від моделі рельєфу і точності, з якою розробляється класифікація, отримане рішення є більш-менш детальним.

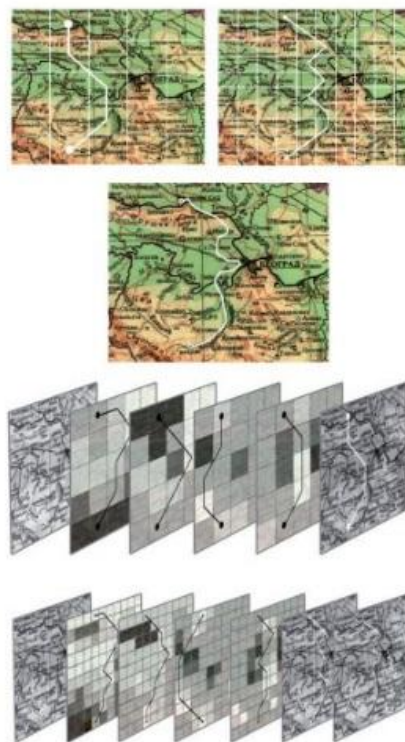
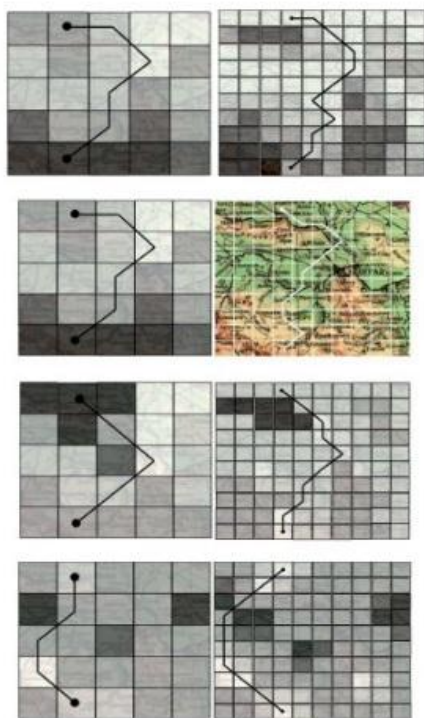


Рис. 6. Приклад процесу прокладання оптимального шляху на основі нейронних мереж Хопфілда

Для моделювання Коїс та Reljin використали НМХ, структуру якої зображено на рис. 5.

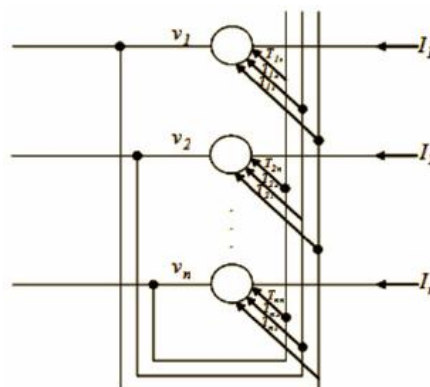


Рис. 5. Модель нейронної мережі Хопфілда

Основною перевагою реалізації НМХ є можливість апаратної реалізації.

Ряд робіт показує, що НМХ дають хороші результати в задачах знаходження найкоротшого або оптимального шляху (рис. 6). З другого боку, основним недоліком мережі цього виду є її можлива нестабільність і той факт, що НМХ не завжди дає оптимальне рішення [8–11]. Проте, як показав Хопфілд, у випадку, якщо отримане рішення не є оптимальним, його можна буде віднести до категорії рішень, які дуже близькі до оптимальних [5].

Використання НМХ для аналізу пересування БПЛА на теперішній час не є класичним застосуванням та деякими авторами визнається як неперспективне. Тому накопичення досліджень у цьому напрямі, а також вдосконалення критеріїв, умов, та методів обробки результатів як моделювання, так і апаратних реалізацій у подальшому покажуть доцільність або негатив такого підходу.

Моделювання поведінки БПЛА на основі нейронних мереж є альтернативою іншим видам моделювання на основі математичних методів, тому що їх результати схожі. Проте нейронні мережі швидше працюють і не вимагають великих обчислювальних потужностей або складних обчислень. На перший погляд, головний недолік полягає в потребі мати окремі нейронні мережі для кожного етапу польоту, як зазначено раніше. Але математичні моделі також є специфічними для кожного з етапів, та одне з можливих рішень цієї проблеми може бути використане для іншої нейронної мережі, яка активує певну мережу в підходящий момент. В цілому, моделі ідентифікації використовують орієнтацію у просторі XYZ, щоб моделювати систему БПЛА.

Таким чином, **мета дослідження** полягає в тому, щоб обрати з існуючого математичного апарату ефективний метод динамічної ідентифікації таких систем, як БПЛА, дослідити умови його застосування для цього класу задач, розробити алгоритм і математичну модель пошуку оптимального шляху БПЛА для реалізації в інтерактивному середовищі для програмування, чисельних розрахунків та візуалізації результатів, наприклад, у такому, як середовище MATLAB.

Основна частина. Основними етапами роботи НМХ, що використовується для планування шляху БПЛА, є:

1. Знайти оптимальне рішення Парето на основі декількох факторів.
2. Збалансувати всі входи і визначені умови найкращим чином.
3. З'єднати початкову і кінцеву точки в унікальному шляху, без переривання.
4. Переконавшись, що кожній під'єднаній області присвоєне числове значення для кожного з факторів, на основі яких виконується оптимізація.
5. Забезпечити перевагу певних входів згідно з побажаннями розробника маршруту.
6. Підтримати роботу з довільною кількістю взаємопов'язаних областей.

7. Забезпечити безумовне проходження через пов'язані між собою області або їх перевизначення, якщо є така необхідність.

8. Включити кожен із факторів, які слід класифікувати, в довільну кількість поділок.

9. Забезпечити можливість вибору точності і швидкості реалізації шляхом зміни параметрів нейронної мережі Хопфілда.

10. Переконавшись, що, в разі будь-якої несправності, є можливість перервати пошук оптимального шляху та інформувати користувача.

Ця робота розглядає нейронні мережі як альтернативу емпіричній моделі. Основними перевагами нейронної мережі є низька обчислювальна потужність і здатність зберігати модель, як тільки мережа була навчена. До того ж, це робить непотрібними попередні знання, тому що мережа може навчатися.

Процес ідентифікації має вирішальне значення для контролю, що забезпечує автономію БПЛА. Моделі управління мають бути протестовані з використанням імітаторів, і у випадку, якщо ідентифікація була точною, вони будуть мати більш високу продуктивність у реальних умовах.

Проведене дослідження зосереджене на контрольованих нейронних мережах, які потребують моделі навчання для регулювання їх параметрів таким чином, щоб виходи мереж стали якомога ближчими до навчальних шаблонів. Після того як мережа була скоригована відповідно до навчальної моделі, вона готова до використання, і її параметри більше не будуть модифікуватись.

Таким чином, дуже важливо ретельно вибирати навчальні зразки, використовуючи найбільш підходящі шаблони для різних станів системи.

Найбільш ефективною для вирішення поставлених задач можна вважати гібридну мережеву архітектуру, яка об'єднує в собі якості рекурентної та нерекурентної мереж (рис. 7).

Розглянемо проблему прокладання оптимального шляху у контексті пересування БПЛА по місцевості.

Для ідентифікації такої системи, як БПЛА потрібно виконати деякі коригування, котрі повинні бути проаналізовані на гібридній мережі.

Політ БПЛА базується на орієнтації у просторі та швидкості. По-перше, визначаються причини, що приводять до зміни по-

ложення БПЛА. Таким чином, існують два етапи моделювання: перший складається з моделювання положення на основі команд, що посиляються до БПЛА, а другий – з імітації позиції, що базується на положенні і попередніх станах.

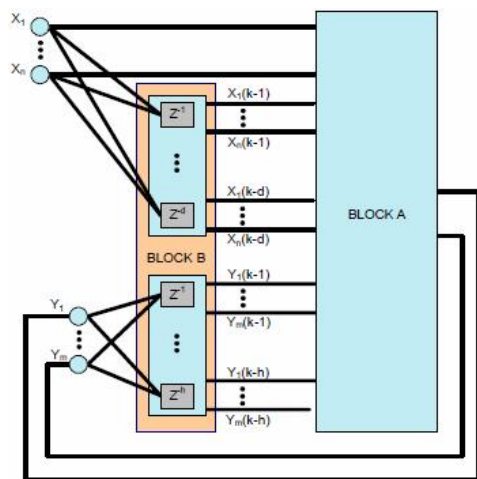


Рис. 7. Гібридна мережа Хопфілда

Можна використати два різні методи для навчання контрольованої мережі. У першому з них обидві системи з'єднуються каскадно, і їхній вихід використовується для навчання системи позиціонування. У другому здійснюється паралельне навчання обох систем, але ця архітектура не бере до уваги помилку, коли дані йдуть з виходу першої мережі до входу наступної. Саме з цієї причини прийнято використовувати перший метод.

Модель структури гібридної мережі Хопфілда запропоновано модифікувати за рахунок введення додаткового модуля аналізу географічних координат (рис. 8).

На рис. 8 зображено каскадну архітектуру навчання системи польоту БПЛА. Для навчання використовують дані, отримані з AHRS (курсовертикаль), від GPS, від радіопередавача і шаблони, використані при навчанні.

Шаблоном для навчання є вектор $T(1)$, який показує стан, отриманий від GPS:

$$T = [x(t), y(t), z(t)]. \quad (1)$$

Після того як система навчилася, моделювання працює послідовно і визначає положення, виходячи з відношення, тому ефективно працювати з каскадною архітектурою. Потреби у використанні вихідного сигналу системи як вхідних даних для наступної передбачають можливість поширення помилки від відношень у мережі до її позицій. Цей метод

навчання бере цю помилку до уваги і виправляє її у відношеннях системи.

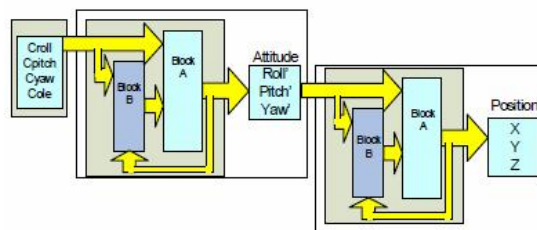


Рис. 8. Каскадна архітектура навчання

При порівнянні $T(1)$ і $Y(2)$ для корекції повторюваних мережевих параметрів помилки, що утворюються на виході, розглядаються як вхідний параметр X у рівнянні (1):

$$Y = [x'(t), y'(t), z'(t)]. \quad (2)$$

Алгоритм, розроблений для навчання і моделювання поведінки БПЛА за допомогою НМХ, був відтворений у MATLAB r2009b. Хоча MATLAB надає велику кількість інструментів, не всі з них можуть бути використані через динамічні характеристики системи. З цієї причини були розроблені нові алгоритми.

Крім теоретичних проблем у системі, повинні бути розглянуті й практичні питання, наприклад, польоти за поганих погодних умов, якість GPS сигналу, пошкодження обладнання, системні вібрації та багато інших. Єдиним рішенням цих проблем є виконувати багато рейсів (фізичних або змодельованих), змінювати їх умови, щоб гарантувати репрезентативну вибірку.

Після завершення процесу збору даних необхідно використовувати певні критерії для вибірки отриманих даних (критерії якості, критерії форми тощо).

Навчання мережі вважається дискретним процесом часу. Таким чином, необхідно, щоб зразки отримувались періодично. Для того щоб забезпечити правильну роботу системи, дуже важливо виконати періодичну вибірку. В іншому випадку, можна застосовувати критерії періодичності, інтерполяції і екстраполяції.

Тести і результати. Моделювання буде проводитися з набором навчальних зразків, що складається з дев'яти льотних сесій (близько 3 хвилин кожна), і з дотриманням необхідних критеріїв.

Програма поетапно (поітераційно) демонструє поточний стан активності мережі кожні 4 секунди.

На рис. 9 показана динаміка розв'язку за допомогою НМХ задачі пошуку оптимального шляху БПЛА за принципом sudoku.

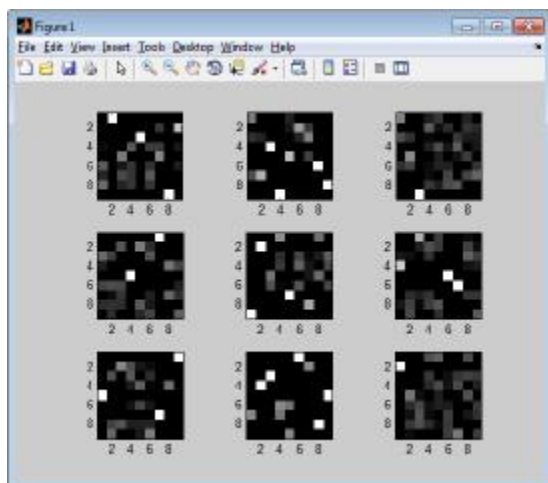


Рис. 9. Пошук шляху БПЛА за принципом sudoku

Отримані результати свідчать, що НМХ можна використати для навчання БПЛА, тобто для визначення найкращого маршруту, виходячи з вхідних критеріїв та факторів.

Результат навчання системи стає остаточно відомим приблизно за годину після початку виконання. На рис. 10 зображено сумарне представлення усіх станів за весь час (як функція часу). Значення завжди збільшується та наближується до 90. Результат навчання системи стає остаточно відомим приблизно за годину після початку виконання. Програма закінчує роботу, коли досягає значення, більшого за 89,999.

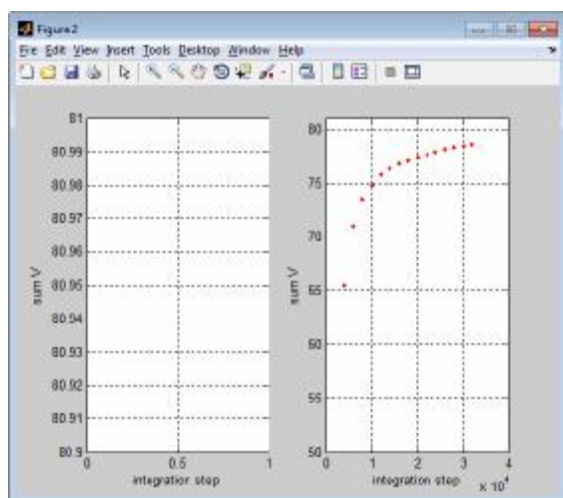
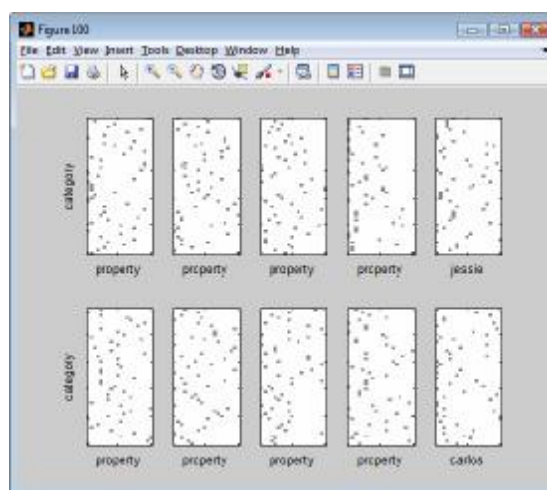


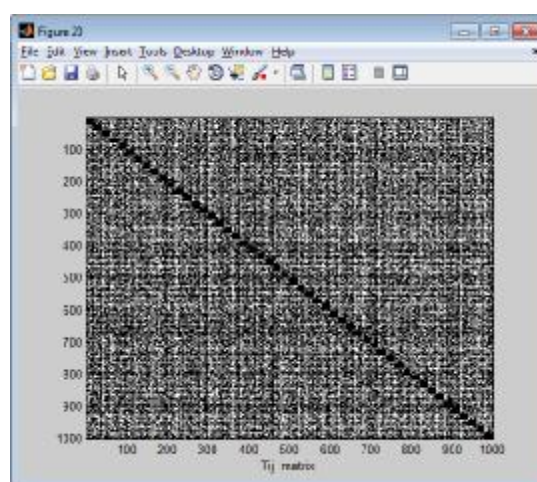
Рис. 10. Стан БПЛА як функція часу

Конвергенцію результатів для отримання різної кількості станів взаємодії БПЛА зображено на рис. 11. Матриця ваги T_{ij} використовується для збереження 10 (рис. 11, а) та 225 (рис. 11, б) комірок пам'яті, отриманих після навчання БПЛА і необхідних для його подальшого пересування.

На рис. 11, а результатом роботи перших п'яти шагів є комірка під назвою *jessie*, а загальним результатом роботи усіх комірок є комірка під назвою *carlos*. Кінцева комірка в нашому випадку буде зберігати інформацію про шлях, за яким БПЛА здійснюватиме свій рух. Кожна комірка розглядатиме свій критерій, що може впливати на політ, а кожна наступна буде додавати новий критерій та редагувати маршрут згідно з доданим критерієм.



а)



б)

Рис. 11. Конвергенція результатів взаємодії БПЛА: а – 10 станів, б – 225 станів

Основна відмінність між результатами моделювання різної кількості станів БПЛА, що пересуваються в єдиній інфраструктурі та повинні взаємодіяти, полягає в помилці, яка зменшується у процесі навчання системи. Важливо відзначити, що після того, як мережа була навчена, крок моделювання відбувається практично миттєво, оскільки він являє собою множення вхідного вектора і матриці ваг зв'язків нейронної мережі.

Необхідно враховувати, що радіальні базисні мережі мають більш високу продуктивність для локальних наближень.

Висновки. За результатами досліджень з існуючого математичного апарату було обрано ефективний метод динамічної ідентифікації таких систем, як БПЛА, та досліджено умови його застосування для цього класу задач. Таким методом було запропоновано різновид НМХ, а саме – контрольовані нейронні мережі Хопфілда.

Розроблено модифіковану модель структури (за рахунок введення додаткового модуля аналізу географічних координат) і математичну модель пошуку оптимального шляху БПЛА за принципом sudoku (за рахунок введення додаткових обмежень).

Розроблені моделі та отримані результати моделювання у середовищі MATLAB підтверджують доцільність використання цього методу для формування маршрутів БПЛА.

Дослідницьким шляхом доведено, що політ БПЛА має кілька стадій, які краще розглядати окремо. Таким чином, для зльоту або посадки БПЛА формуються окремі конкретні НМХ. Також окремі НМХ мають бути побудовані для деяких конкретних маневрів польоту, при різних фізичних і погодних умовах.

Важливість цієї роботи полягає у пошуку та реалізації нових напрямів досліджень. Отримані результати моделювання дозволяють зробити попередні висновки про те, що нейронні мережі є дійовим інструментом для ідентифікації системи з декількох БПЛА, а також для прогнозування поведінки такої системи у часі та на географічному просторі.

References

1. Goldman, J. (2016), Drones hit new heights at CES 2016. *CNET, Gadgets*, January 10,

available at: <http://www.cnet.com/news/drones-ces-2016/>

2. State and local regulation of unmanned aircraft systems (UAS) fact sheet (2015), *Federal Aviation Administration Office of the Chief Counsel*, December 17, available at: https://www.faa.gov/uas/regulations_policies/media/UAS_Fact_Sheet_Final.pdf
3. Proposal to create common rules for operating drones in Europe (2015), *European Aviation Safety Agency (EASA)*, September, available at: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/205933-01-EASA_Summary%20of%20the%20ANPA.pdf
4. Musiyenko, M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V. and Kulakovska A. O. (2016), Simulation of the behavior of robot subswarm in spatial corridors, in: *36th International Conference on ELECTRONICS and NANOTECHNOLOGY (ELNANO-2016)*, Kyiv.
5. Hopfield, J. J. (1982), Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 79, pp. 2554–2558.
6. Yan, M. (2016), Dijkstra's Algorithm (Presentation), *Massachusetts Institute of Technology, Department of Mathematics*, available at: <http://math.mit.edu/~rothvoss/18.304.3PM/Presentations/1-Melissa.pdf>
7. Kojic, N., Reljin, I. and Reljin, B. (2013), Route selection problem based on Hopfield neural network, *Radioengineering*, Vol. 22, No. 4, Dec., pp. 1182–1193.
8. Rana, A. S. and Zalzal, A. M. S. (1997), A neural networks based collision detection engine for multi-arm robotic systems, in: *5th International conference on artificial neural networks*, pp. 140–145.
9. Guang, Y. and Vikram, K. (2002), Optimal path planning for unmanned air vehicles with kinematic and tactical constraints, in: *Proceedings of the 41th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 1301–1306.
10. Pashkevich, A. and Kazheunikau, M. (2005), Neural network approach to trajectory synthesis for robotic manipulators, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 16, pp. 173–187.
11. Bortoff, S. A. (2000). Path planning for UAVs, in: *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, Vol. 1, pp. 364–368.

M. P. Musiyenko, *Dr.Tech.Sc., professor, dean of the Computer Science Faculty,*
e-mail: musienko2001@ukr.net

I. M. Zhuravska, *Ph. D., associate professor*
Petro Mohyla Black Sea State University (BSSU),
68 Desantnykiv str., 10, Mykolaiv, 54003, Ukraine

ALGORITHMS FOR LAYING OF THE ROUTE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORKS

The models, methods and algorithms for laying of the route of unmanned aerial vehicles (UAV) are considered in the paper. Mathematical tools of Hopfield neural networks (HNN) are offered to use for the defined task. A modeling of UAV behavior in MATLAB r2009b environment is carried out. A modified model of the HNN structure (due to the adding of additional module for geographical coordinates analysis) and a mathematical model of laying the optimal route for UAV according to Sudoku principle (by adding additional constraints) are developed. The experiments have proved the adequacy and efficiency of the offered method and developed models for laying of UAV routes.

Keywords: UAV, laying of route, Hopfield neural network, mathematical modeling, MATLAB.

Статтю представляє М. П. Мусієнко, д.т.н., професор, Чорноморський державний університет імені Петра Могили.

К. В. Колесніков, к.т.н, доцент,
e-mail: klsn@i.ua

А. Р. Карапетян, старший викладач,
e-mail: anait.r.karapetyan@gmail.com

В. Ю. Баган, магістрант
e-mail: Windbringer579@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

У статті представлені результати експериментального дослідження вдосконалених моделей та методів адаптивної маршрутизації та розподілу ресурсів за допомогою штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів.

Ключові слова: маршрутизація, адаптивна маршрутизація, багатокритеріальна оптимізація, генетичний алгоритм, нейронні мережі, мережі Хопфілда.

Постановка проблеми. Зростання кількості користувачів комп'ютерних мереж зумовлює зростання складності структур мереж і взаємодії між ними. Відповідно ускладнюється і пошук оптимальних шляхів у мережі для швидкої доставки запитів, тобто ускладнюється завдання маршрутизації.

Для розв'язання задач маршрутизації використовуються класичні алгоритми, які оперують одним параметром оптимізації. Однак кожному гілку мережі характеризують кілька параметрів (пропускна здатність, затримка, швидкість передачі, навантаження, надійність). Таким чином, у сучасних мережах з'явилась необхідність розв'язання задачі про найкоротші шляхи з кількома критеріями оптимізації. Тому виникає актуальна необхідність формування нових підходів та алгоритмів розв'язання задач пошуку оптимальних шляхів з багатьма критеріями.

Через складність структур сучасних комп'ютерних мереж задача маршрутизації не вирішується повною мірою. У більшості випадків це пов'язано з маршрутизаторами, які не справляються з підтриманням таблиць маршрутизації і вибором оптимальних маршрутів для даного класу трафіку. Тому виникає завдання дослідження існуючих алгоритмів маршрутизації з метою поліпшення їх характеристик або створення нових алгоритмів маршрутизації.

Аналіз останніх досліджень. До недавнього часу теоретичну базу для проектування і моделювання систем розподілу інформаційних потоків забезпечувала теорія телеграфіку, яка є однією з гілок теорії масового обслуговування, що отримала свій розвиток у роботах ряду авторів: А. К. Ерланг, Л. Клейнрок, Г. П. Башарин, А. Д. Харкевич, В. М. Вишневецький та ін. Найбільш поширеною моделлю потоку викликів у теорії телеграфіку є стаціонарний пуассонівський потік, відповідний для мереж з комутацією каналів. У роботах зарубіжних дослідників (W. Leland, D. Wilson, I. Noros, В. І. Нейман, Б. С. Цибаков, О. І. Шелухін, В. С. Заборовський, А. Я. Городецький) стверджується, що трафік у мережах з комутацією пакетів має так звану властивість «самоподібності». У результаті теоретичні розрахунки характеристик сучасних систем розподілу інформації за класичними формулами дають некоректні результати щодо довжин черг і часу затримок пакетів [1].

Таким чином, розробка моделей і алгоритмів маршрутизації, що враховують завантаженість ліній і «самоподібність» трафіку, є актуальною.

Метою роботи є дослідження ефективності використання мережних ресурсів у розподілених мережах за допомогою штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів.

Виклад основного матеріалу. Стандартна математична задача оптимізації формулюється таким чином.

Серед елементів x , що утворюють множину X , знайти такий елемент x^* , який доставляє мінімальне значення $f(x^*)$ заданої функції $f(x)$. Щоб коректно поставити завдання оптимізації, необхідно задати: допустиму множину X ; цільову функцію – відображення $f: X \rightarrow R$; $X \rightarrow$ критерій пошуку (max або min).

Якщо мінімізована функція не є опуклою, то часто обмежуються пошуком локальних мінімумів і максимумів – точок x_0 таких, що в деякому їх оточенні $f(x) \geq f(x_0)$ для мінімуму і $f(x) \leq f(x_0)$ для максимуму.

Якщо допустима множина $X = R^n$, то таке завдання називається завданням безумовної оптимізації, в іншому випадку – завданням умовної оптимізації.

Існує декілька методів оптимізації, які можна розділити на три групи: детерміновані; випадкові (стохастичні); комбіновані.

Зокрема, великий інтерес становлять еволюційні методи, які є стохастичними. Еволюційні методи ґрунтуються на прикладі робо-

ти еволюції і навчання, до таких методів відносять нейронні мережі, генетичні алгоритми.

Генетичний алгоритм – це евристичний алгоритм пошуку, використовується для вирішення завдань оптимізації та моделювання шляхом випадкового підбору, комбінування і варіації параметрів з застосуванням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію, є різновидом еволюційних обчислень. Характерна особливість генетичного алгоритму – акцент на використанні оператора «схрещування», що виробляє операцію рекомбінації рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещування в живій природі [3].

Дослідження в галузі оптимізації із застосуванням генетичних алгоритмів є надзвичайно актуальними. В результаті проведених досліджень [4] виконано моделювання розробленого методу пошуку оптимальних маршрутів за допомогою генетичних алгоритмів.

Застосовуючи цей алгоритм при різних початкових умовах (чисельність популяцій, відсоток мутацій), проведено дослід. Отримані результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця дослідів

Дослід 1		Дослід 2		Дослід 3	
Ітерація	Тривалість туру	Ітерація	Тривалість туру	Ітерація	Тривалість туру
6282	5144,85	8777	5998,4	9343	5737,99
14333	3634,53	13662	5348,55	20433	4333,22
25364	3026,23	24479	4464,12	25055	4058,96
31278	2742,6	41372	3318,84	40753	3461,64
39355	2581,27	62722	2898,17	51420	3244,98
48014	2286,55	85593	2597,13	71485	2951,9
79343	2203,49	101107	2553,54	83948	2843,87
88723	2146,63	135637	2505,06	105026	2739,95
115516	2127,27	886121	2504,18	146509	2555,04
142258	2114,02	1768136	2502,01	182131	2504,17
375044	2104,71	2213009	2476,38	206007	2475,27
1063165	2104,71	7825301	2426,3	4672430	2443,77
10000000	2104,71	10000000	2426,3	10000000	2443,77

Сформовані підходи дозволяють значно спростити розв'язання задачі маршрутизації у складних комп'ютерних системах.

Ще одним із підходів до вирішення задачі маршрутизації є використання нейронних мереж [2, 8].

Для розв'язання задачі оптимізації маршрутизації обрано алгоритм нейронної мережі Хопфілда з використанням функції енергії Ляпунова. Мережі Хопфілда є рекурентними мережами, або мережами зі зворотними

зв'язками і якнайкраще підходять для пошуку оптимального маршруту [9].

При дослідженні можливостей нейронних мереж для вирішення завдання маршрутизації було показано необхідність використання нейронної мережі Хопфілда [5].

При проведенні досліджень для прикладу використовувалася структура мережі, зображена на рис. 1.

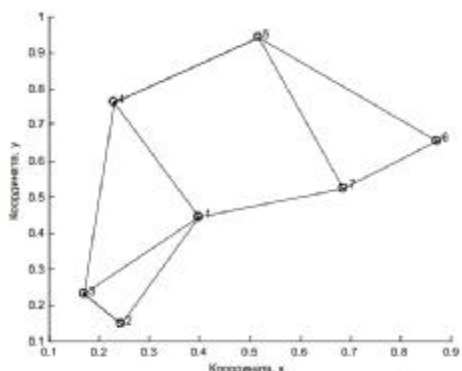


Рис. 1. Структура мережі для дослідження запропонованої функції оптимізації

Мережа складається з семи вузлів, джерело і пункт призначення знаходяться у вузлах з номерами 5 і 2.

Для функції активації використовується вдосконалена функція Ляпунова [6]:

$$E_{PKH} = \frac{\mu_1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(v_{ij} \sum_{k=1}^N (1 - c_{ik}) c_{kj} \right) + \frac{\mu_2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_{ij} v_{ij} + \frac{\mu_3}{2} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N v_{ij} + \sum_{j=1}^N v_{ji} - \varphi_i \right)^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} (1 - v_{ij}) + \frac{\mu_5}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(v_{ij} \sum_{k=1}^N v_{ki} \right) + \frac{\mu_6}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} h_{ij}, \quad (1)$$

де μ_n – деякі вагові коефіцієнти;

c_{ij} – «вартість» передачі пакетів між вузлами;

v_{ij} – частка інтенсивності потоку, що надходить;

a – коефіцієнт, що визначає крутизну активаційної функції.

Вона дозволяє не тільки знаходити маршрут, але й регулювати кількість дуг.

Коефіцієнт μ_1 і відповідна складова функції впливають на швидкість пошуку мінімальної вартості передачі пакетів по маршруту з вузла s у вузол d . Введення складової функції при коефіцієнті μ_2 обумовлено використанням тільки існуючих зв'язків. Наприклад, деякі дуги в графі можуть бути відсутніми, тому відповідний коефіцієнт c_{ij} дорівнюватиме нескінченності. У цьому випадку γ_{ij} дорівнюватиме 1. У свою чергу, це призведе до збільшення функції (1), а це неприпустимо при вирішенні задачі мінімізації. При вирішенні задач маршрутизації це гарантує виключення неіснуючих шляхів за рахунок блокування включення в маршрут неіснуючих каналів.

Доданок з коефіцієнтом μ_3 введено для виконання умови збереження потоку у вузлі. Доданок з коефіцієнтом μ_4 вводиться для забезпечення виконання умови $v_{ij} \in \{0,1\}$,

не дозволяючи отримати перевагу якомусь нейрону. Для реалізації процесу пошуку рішення задачі знаходження найкоротшого шляху необхідно визначити алгоритм зміни ваг зв'язків у нейронній мережі. Для цього визначимо матрицю ваг у мережі $U = \|u_{ij}\|$.

В окремому випадку зміну ваг зв'язків у нейронній мережі можна проводити, використовуючи такий вираз:

$$\frac{\partial u_{ij}}{\partial t} = -u_{ij} - \frac{\partial E}{\partial v_{ij}}.$$

Це дозволить, використовуючи метод градієнтного спуску, мінімізувати функцію (1) і знайти стійкий стан мережі Хопфілда, що відповідатиме найкоротшому шляху між вузлами s і d [10].

Для проведення дослідження можливостей штучної нейронної мережі Хопфілда при вирішенні задачі знаходження шляху найменшої довжини були використані структури з кількістю вузлів 5, 10, 15 і 20.

Для дослідження можливості розв'язання задачі пошуку найкоротшого шляху при моделюванні в системі MATLAB були задані значення коефіцієнтів і змінних, наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Коефіцієнти для розв'язання задачі пошуку шляху мінімальної довжини

Параметр	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	a
Значення	950	2500	1900	100	500	50

Таблиця 3

Результати проведених досліджень

Кількість вузлів у мережі, N	s	d	Оцінка кількості правильних рішень, %	$P_{\min}$	$P_{\max}$
5	1	5	97,2	0,51	1,68
	2	3	100	0,11	1,28
	3	5	84,2	0,79	1,6
	5	4	99,9	0,33	1,59
	4	2	88,9	0,61	1,77
10	1	10	3	0,47	1,68
	2	7	10	0,34	1,59
	5	3	99	0,34	1,79
	3	9	87	0,37	1,63
	6	4	92	0,22	1,59
15	1	15	90	1,77	2,14
	6	12	87	2,32	3,22
	14	6	93	3,18	3,85
	7	12	92	1,87	3,73
	4	6	90	2,77	3,14
20	1	20	87	3,32	4,22
	5	17	93	3,18	4,85
	18	3	92	2,87	5,73
	17	4	93	3,18	7,85
	4	11	92	3,87	6,73

В результаті проведених досліджень були отримані наступні результати, зображені на рис. 2–8.

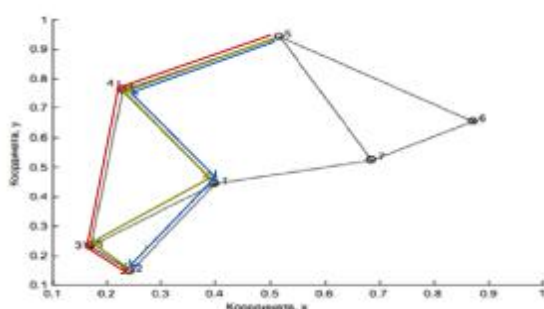
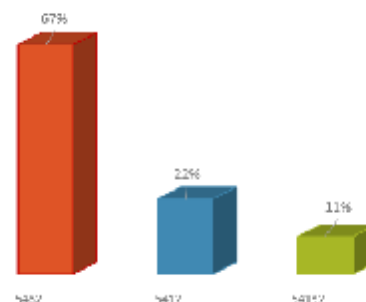


Рис. 2. Граф що відображає маршрути

Використовуючи значення $\mu_6 = 500$, алгоритм знаходить найкоротший шлях по кількості вузлів, але без урахування ваги; отримані результати зображені на рис. 3.

Рис. 3. Результати рішення задачі маршрутизації при використанні функції Ляпунова з $\mu_6 = 500$

Використовуючи $\mu_6 = 100$, алгоритм знаходить ще один шлях зі збільшеною кількістю вузлів, але також без урахування ваги. Отримано результати, зображені на рис. 7, тому потрібно брати значення більше 100 та менше 500.

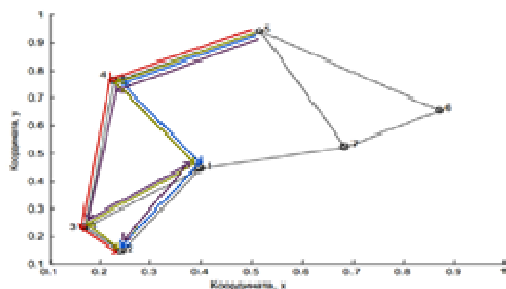


Рис. 4. Граф що відображає маршрути

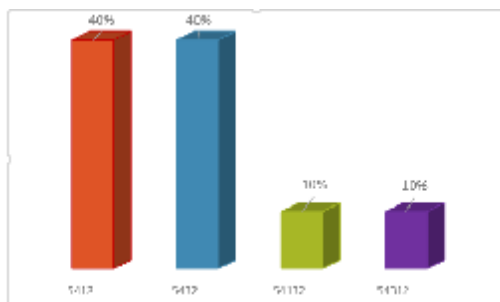
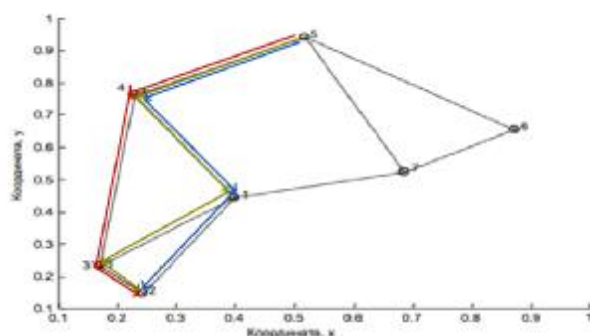
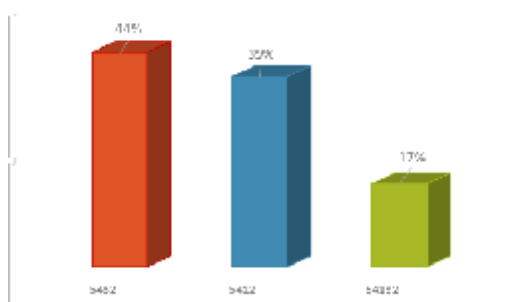
Рис. 5. Результати рішення задачі маршрутизації при використанні функції Ляпунова з $\mu_6 = 100$ 

Рис. 6. Маршрути графа

Рис. 7. Результати рішення задачі маршрутизації при використанні функції Ляпунова з $\mu_6 = 250$

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що коефіцієнтові μ_6 необхідно приймати значення 250, тому що

при цьому зберігається висока швидкість збіжності алгоритму і забезпечується висока ймовірність вирішення завдання пошуку маршруту мінімальної «вартості» і з найменшою кількістю дуг.

Так, у випадку, якщо для оптимізації використовується вираз (1), то отримуємо результат, зображений на рис. 8.

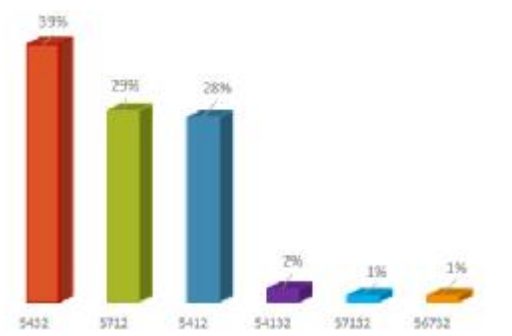


Рис. 8. Результати рішення задачі маршрутизації при використанні виразу (1) без регулювання кількості використовуваних дуг

Висновки. З отриманих результатів видно, що графи можуть містити рішення з чотирьох, п'яти і шести дуг, а при використанні виразу вдосконаленої функції Ляпунова рішення містять тільки маршрути з чотирьох і п'яти дуг. При цьому нейронна мережа в ході пошуку маршрутів прагне знаходити більше рішень, які містять шлях меншої довжини з меншою кількістю дуг.

Запропонований вид функції здатен вирішувати задачу маршрутизації з перебуванням шляху мінімальної вартості і з використанням мінімальної кількості дуг.

На основі виконаних досліджень зроблено висновок, що еволюційні алгоритми є досить потужним математичним інструментом і можуть з успіхом застосовуватися для вирішення широкого класу прикладних задач, включаючи ті, які важко або навіть взагалі неможливо вирішити іншими методами. Час збіжності таких алгоритмів може змінюватись залежно від необхідної точності та динаміки зміни мережі.

Перспективним напрямом є використання еволюційних алгоритмів оптимізації для створення сучасних протоколів маршрутизації, які враховують як характеристики мережових з'єднань, так і обладнання.

Сформовані підходи дозволяють значно спростити (а для деяких окремих випадків є єдиним варіантом) розв'язання задачі маршрутизації у розподілених комп'ютерних мережах.

Список літератури

1. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы : учеб. пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – 2-е изд. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.
2. Wieselthier J. E. A neural networks approach to routing without interference in multihop networks / J. E. Wieselthier, C. M. Barnhart, A. Ephermides // *IEEE Transactions on Comm.* – 1994. – Vol.42, no.1. – P. 166–177.
3. Rosenberg R. S. Simulation of genetic populations with biochemical properties / R. S. Rosenberg // *Mathematical Biosciences*. – 7. – P. 223–257.
4. Колесніков К. В. Застосування нейронних мереж Хопфілда до задач адаптивної маршрутизації даних в телекомунікаціях / К. В. Колесніков, А. Р. Карапетян, О. В. Кравченко // *Автоматика*. – Т. 2. – Харків : ХНУРЕ, 2010. – С. 168–169.
5. Колесніков К. В. Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних / К. В. Колесніков, А. Р. Карапетян, Т. А. Царенко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – № 56 (1029). – С. 44–50.
6. Колесніков К. В. Використання нейромережових моделей для знаходження оптимального шляху в мережах з адаптивною маршрутизацією пакетів даних / К. В. Колесніков, О. Г. Нікулін, А. Р. Карапетян // *Вісник. Нові рішення в сучасних технологіях*. – № 56. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 50–56.
7. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры в разработке военной техники США / А. И. Галушкин // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1995. – № 6. – С. 4–21.
8. Білоус Р. В. Особливості прикладного застосування генетичного алгоритму пошуку оптимальних шляхів на графі / Р. В. Білоус, С. Д. Погорілий // *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 81–87.
9. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника : теория и практика / Ф. Уоссерман. – М. : Мир, 1990.

10. Hopfield J. J. Neural computation of decisions in optimization problems / J. J. Hopfield, D. W. Tank // *Biol Cybern.* – 1985. – V. 52, № 3. – P. 141–152.

References

1. Gladkov, L. A., Kureichik, V. V. and Kureichik, V. M. (2006), Genetic algorithms. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 320 p. [in Russian].
2. Wieselthier, J. E., Barnhart, C. M. and Ephermides, A. (1994), A neural networks approach to routing without interference in multihop networks. *IEEE Transactions on Comm.*, 42 (1), pp. 166–177.
3. Rosenberg, R. S. Simulation of genetic populations with biochemical properties, *Mathematical Biosciences*, (7), pp. 223–257.
4. Kolesnikov, K. V., Karapetyan, A. R. and Kravchenko, O. V (2010), Application of Hopfield neural networks for problems of adaptive routing data in telecommunications. *Avtomatika*, (2), Kharkiv : KhNURE, pp. 168–169 [in Ukrainian].
5. Kolesnikov, K. V., Karapetyan, A. R. and Tsarenko, T. A. (2013) Genetic algorithms for multicriterion optimization problems in networks of adaptive routing data. *Visnyk NTU "KhPI"*, 59 (1029), pp. 44–50 [in Ukrainian].
6. Kolesnikov, K. V., Nikulin, O. G. and Karapetyan, A. R. (2013), The use of neural network models for finding the optimal way in networks with adaptive routing of data packets. *Visnyk. Novi rishennya v suchasnyh tehnologiyah*, (56), Kharkiv : NTU "KhPI", pp. 50–56 [in Ukrainian].
7. Galushkin, A. I. (1995) Neurocomputers in the development of US military equipment. *Zarubezhnaya radioelektronika*, (6), pp. 4–21 [in Russian].
8. Bilous, R. V. and Pogorilyy, S. D. (2010), Features of applied use of genetic algorithm for the search of optimal ways on the graph. *Reyestratsiya, zberigannya i obrobka danyh*, 12 (2), pp. 81–87 [in Ukrainian].
9. Uosserman, F. (1990), Neurocomputing equipment : theory and practice. Moscow: Mir [in Russian].
10. Hopfield, J. J. and Tank, D. W. (1985), Neural computation of decisions in optimization problems. *Biol. Cybern.*, 52 (3), pp. 141–152.

K. V. Kolesnikov, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: klsn@i.ua

A. R. Karapetyan, *senior lecturer*,
e-mail: anait.r.karapetyan@gmail.com

V. Yu. Bahan, *undergraduate*
e-mail: Windbringer579@gmail.com

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THE ANALYSIS OF THE INVESTIGATION RESULTS ON THE REALIZATION OF ROUTING TASK BASED ON NEURAL NETWORKS AND GENETIC ALGORITHMS

There appears a necessity to solve tasks concerning the shortest ways with several optimization criteria. For this reason the task of the formation of new approaches and algorithms for the solution of problems of optimal rooting in networks becomes an actual one.

The object of the study is to research the efficiency of the use of net resources in the distributed networks by means of artificial neural networks and genetic algorithms.

As a result of the researches the modeling of the developed method of route optimization by means of genetic algorithms has been done. The researches have been performed using the presented algorithm with various preconditions (populations sizes, mutation percentage). The conclusion is made based on the two last researches: the first minimal determined value with 3 % error between them was found less than in 5 seconds. The following solutions differ by less than 1 % error. It is possible to speed up the work of algorithm by assigning right sizes of original population and mutation percentage. One more approach to solve the routing task is the use of neural networks. Hopfileld's neural network algorithm with the use of Lyapunov's function has been chosen to solve the task of routes optimization.

Using the gradient descent method it has allowed to minimize the function and to find the stable state of Hopfileld's network which corresponds to the shortest way between the nodes.

To research the possibilities of Hopfileld's neural network when solving the task of finding the shortest way the structures with numbers of nodes 5, 10, 15 and 20 were used. The obtained results show that graphs can contain the solutions consisting of four, five and six arrows and that the solutions contain only routes of four and five arrows when the expression of improved Lyapunov's function is used. At the same time the neural network in the course of routes search is aimed to find more solutions containing the shortest way with the smallest number of arrows.

Keywords: *routing, adaptive routing, multicriterion optimization, genetic algorithm, neural networks, Hopfield nets.*

*Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н, професор,
М. П. Мусієнко, д.т.н, професор*

О. М. Пилипенко¹, д.т.н., професор,

Д. П. Рубан¹, к.т.н., доцент,

e-mail: ruban_dimon@mail.ru

Г. Я. Рубан², викладач-методист

e-mail: ganna-gaivoronsk@mail.ru

¹Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

²Черкаський державний бізнес коледж

вул. Чорновола, 243, м. Черкаси, 18028, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОНОВЛЕННЯ АВТОБУСНОГО ПАРКУ М. ЧЕРКАСИ

Встановлено невідповідність роботи міських автобусних перевезень у м. Черкаси сучасним тенденціям розвитку транспортної інфраструктури та європейським стандартам. Доведено необхідність у науковому обґрунтуванні формування раціональної експлуатації та ефективного оновлення автобусного парку м. Черкаси і відповідно розроблено рекомендації.

Ключові слова: місто, транспортна система, транспортна стратегія, автобус, пасажиропотоки, раціональна структура, ефективність перевезень.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Як правило, українські міста після розпаду СРСР потребують оптимального формування структури та оновлення автобусного парку. Це обумовлюється старінням автобусів, реорганізацією форми власності (перехід від державної до приватної), закриттям або відкриттям підприємств, розбудовою міста тощо. Такі чинники мають суттєвий вплив на зміну пасажиропотоків. При цьому важливо проводити ефективне оновлення автобусів із розробкою нових маршрутів, розрахунком необхідної кількості автобусів, їх місткості, марки. Однак, практично керуючись ідеями приватних підприємств, у м. Черкаси було проведено безсистемне оновлення автобусного парку. Застарілі автобуси марок «ПАЗ», «ЛАЗ», «Ікарус», починаючи із 90-х років, було поступово замінено новими сучасними автобусами «Богдан», «ПАЗ» та автобусами зарубіжного виробництва, які у країнах ЄС практично відпрацювали ресурс. Незважаючи на це, автобуси, знову ж таки, потребують оновлення, хоча їх власники не поспішають це робити, пояснюючи це тим, що набагато дешевшим є ремонт, ніж заміна. Бувають випадки, що, не вийшовши на чистий прибуток, деякі агрегати автобуса потребують капітального ремонту (двигун, коробка передач, головна передача). Довговічність агрегатів і вузлів автобусів повинна відповідати сталій або кратній величині, що забезпечує ефективність

ремонту або повної заміни. Неефективна робота пояснюється безсистемним формуванням структури та неузгодженим оновленням автобусного парку. Одночасно погіршуються соціальні стандарти якості пасажирських перевезень за такими показниками, як: наповненість транспортного засобу, забезпечення міськими автобусами великої місткості, регулярність руху. Підприємства громадського пасажирського транспорту характеризуються збитковістю через низький рівень тарифів, недостатню компенсацію з бюджету витрат на перевезення пільгових категорій пасажирів, неефективність системи збору виручки від міських перевезень на пасажирському транспорті загального користування. Тому для ефективного роботи транспортної системи м. Черкаси доцільно науково грамотно обґрунтувати оновлення автобусного парку та формування його структури.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Відповідно до «Транспортної стратегії України на період до 2020 року» [1] Україна активно включається у світові суспільно-економічні процеси: приєдналася до Світової організації торгівлі, стратегічною метою визнано отримання асоційованого членства у Європейському Союзі. Транспорт як інфраструктурна галузь має розвиватися випереджальними темпами з метою сприяння швидкому економічному і соціальному розвитку країни та її участі у міжнародному поділі праці.

Сучасне реформування ринку пасажирських перевезень привело до неоднозначних результатів. З одного боку, у перевізників з'явилася можливість самостійно формувати та пропонувати клієнтам відповідні послуги, планувати заходи і визначати напрямки інвестицій. З другого, – у багатьох з них основна частина територіально-технічної бази і транспортних засобів мають значний знос, на деякі перевезення тарифи регулюються неринковими методами, окремі категорії пасажирів мають право на різноманітні пільги при оплаті за проїзд.

Незважаючи на це, ринок пасажирських перевезень у нинішніх умовах є перспективним, хоча потрібно пройти ще певні етапи реформування. Крім цього, сьогодні кожний потенційний пасажир самостійно обирає потрібну йому послугу, виходячи зі своїх фінансових можливостей, оцінювання відношення ціни до якості послуги. На сьогодні розв'язання проблем з міськими пасажирськими перевезеннями набуло актуальності, як ніколи. До їх розв'язання залучаються відомі наукові школи, зокрема, у містах Львів, Вінниця, Кременчук [2, 3].

Усі ці та інші проблеми і задачі щодо вдосконалення транспортного обслуговування населення міст розв'язуються муніципальною владою за підтримки громад, місцевого та державного фінансування. Тому у м. Черкаси на замовлення Департаменту житлово-комунального комплексу Черкаської міської ради було проведено науково-дослідну роботу на тему «Виготовлення науково-технічної продукції щодо дослідження рухомості населення та оптимізації маршрутів громадського транспорту із деталізацією відповідно до концепції розвитку інфраструктури громадського транспорту м. Черкаси на 2011 – 2015 рр.». Роботу виконували науковці НУ «Львівська політехніка» кафедри «Транспортні технології» із залученням студентів напряму підготовки 6.070106 – «Автомобільний транспорт» ЧДТУ. Однак результати науково-дослідної роботи досі не реалізовані. На сьогодні вони можуть бути вже дещо застарілими, адже порівняно з 2012 роком, коли виконувалась науково-дослідна робота, змінилась рухливість населення, нормативна база тощо. Крім того, більшого розвитку набули автоматизовані системи моніторингу пасажиропотоків.

Метою роботи є обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку для підвищення ефективності пере-

везень та якості обслуговування населення у м. Черкаси із урахуванням сучасних тенденцій розвитку транспортної інфраструктури та європейських стандартів.

Виклад основного матеріалу. При оновленні автобусного парку обов'язково враховують умови експлуатації. Умови експлуатації визначаються, перш за все, вимогами якісного обслуговування пасажирів, а також впливом транспортних, дорожніх та кліматичних чинників.

До основних вимог щодо якісного обслуговування пасажирів відносять [6, 8, 9]:

- зручність при вході і виході з транспортного засобу;
- комфортабельність поїздки;
- високу швидкість переміщення;
- можливість перевезень вантажу;
- достатнє утеплення і вентиляцію салону;
- добру видимість місцевості;
- відсутність шуму і задимленості;
- зовнішній вигляд рухомого складу (його колір, інформаційне екіпірування тощо).

До транспортних чинників відносять:

- вид і характер пасажирських перевезень, їх обсяги і регулярність;
- безпеку руху;
- дальність, пору доби і тривалість поїздок пасажирів;
- умови праці водія і кондуктора;
- конструктивні особливості рухомого складу та інтенсивність його експлуатації, надійність і довговічність;
- умови зберігання, обслуговування і ремонту рухомого складу і їх трудомісткості.

Дорожні і кліматичні чинники характеризуються:

- типом покриття, станом і благоустроєм доріг;
- рельєфом місцевості;
- розмірами, щільністю і режимом руху автомобілів по дорогах у різні пори року;
- тривалістю зимового періоду;
- температурою і вологістю повітря.

Також необхідно раціонально планувати міську маршрутну систему. Планування зводяться до забезпечення для пасажирів мінімальної кількості пересадок в одній поїздки і найменших витрат часу на цю поїздку у будь-якому напрямку, а також наповнення рухомого складу на всій довжині маршрутної мережі.

Для оцінювання досконалості маршрутної мережі використовують такі основні показники [4, 6, 8].

Маршрутний коефіцієнт (K_M) характеризує поширеність маршрутної мережі. Визначається він відношенням суми довжин усіх маршрутів ($\sum L_M$) до суми довжин усіх вулиць і проїздів ($\sum L_C$), по яких проходять маршрути пасажирського транспорту:

$$K_M = \frac{\sum L_M}{\sum L_C}. \quad (1)$$

Маршрутний коефіцієнт показує, скільки в середньому маршрутів проходить по кожній ділянці мережі, і характеризує приблизну кількість напрямків, по яких пасажир може їхати з кожної точки мережі. Чим він більший, тим зручніше для пасажирів. Для добре розвиненої транспортної мережі міст він дорівнює $K_M = 2-3,5$, а для малорозвиненої мережі $K_M = 1,2-1,3$ [5, 8].

Автобусна транспортна мережа характеризується щільністю δ , тобто насиченістю території міста лініями автобусного сполучення:

$$\delta = \frac{\sum L_C}{F}, \quad (2)$$

де F – площа міста, км².

Чим більша щільність мережі, тим менші затрати часу пасажирів на підхід до зупинок. Відповідно для м. Черкаси $\delta = 2,0-2,5$ км/км, а для центральних районів міста $\delta = 5-7$ км/км [5].

Довжина шляху підходу до зупинок визначається [5–8]:

$$l_{nx} = \frac{1}{3\delta} \cdot \frac{l_{nep}}{4}, \quad (3)$$

де l_{nep} – довжина перегону, відстань між зупинками.

Для скорочення часу на підхід до зупинок зазвичай збільшують δ і зменшують l_{nep} . Однак збільшення δ розосереджує пасажиропотік, а зменшення l_{nep} знижує швидкість руху автобуса і збільшує тривалість доставки пасажирів до місця призначення.

Автобусні перевезення організовують на визначених маршрутах, обумовлюючи їх вибір розміром і напрямком пасажиропотоків. Маршрути розбиваються на перегони між зупинками залежно від розміщення пасажиронакопичуючих і пасажиророзвізних пунктів.

Оптимальні автобусні маршрути враховують певну кількість ознак класифікації [6–8].

За часом дії:

- а) постійні (протягом цілого року);
- б) тимчасові (сезонні).

За призначенням:

- а) основні маршрути;
- б) підвізні до маршрутів інших видів транспорту.

За умовами використання і характером руху:

- а) звичайні маршрути (зупинка обов'язкова на всіх проміжних пунктах);
- б) скорочені (організовується тільки на визначеній частині звичайного маршруту, де найбільш інтенсивний пасажиропотік) маршрути поділяються на: постійні і періодичні (в час «пик»);
- в) швидкі (автобуси зупиняються тільки на встановлених зупинках);
- г) експресні маршрути (рух автобусів прямим сполученням без зупинок на шляху сполучення) бувають: постійні, тимчасові (літні) і періодичні (в суботу, неділю).

За характером розміщення на території міста:

- а) діаметральні;
- б) радіальні;
- в) тангенціальні (хордові);
- г) кільцеві;
- д) напівкільцеві;
- е) комбіновані маршрути.

Однак більшість черкаських автобусних маршрутів працюють за найпростішими ознаками, тобто можуть не завжди враховувати сезонність пасажиропотоків, періодичність часу «пик» тощо. Крім того, перевізники м. Черкаси не звертають особливу увагу на вибір типу автобуса.

Вибір типу і конструкції автобуса істотно впливає на рівень транспортного обслуговування населення і ефективність його використання. Найменші транспортні витрати можуть бути забезпечені у разі, якщо рухомий склад за типом і місткістю максимально відповідає потужності і характеру пасажиропотоку, а також умовам перевезень пасажирів.

Автобуси великої місткості недоцільно використовувати на маршрутах з незначним пасажиропотоком і протягом усього дня на маршрутах із значною нерівномірністю пасажиропотоку. Це призводить або до великих інтервалів руху і, відповідно, збільшення тривалості часу очікування на зупинках, або до

значного підвищення собівартості перевезень. Експлуатація автобусів малої місткості на маршрутах з потужним пасажиропотоком (наприклад маршрут № 25) зменшує інтервали руху, однак збільшує потребу в них, підвищує завантаженість вулиць, знижує продуктивність роботи.

Під час вибору міських автобусів враховують, перш за все:

- 1) потужність пасажиропотоку в одному напрямку на найбільш завантаженій ділянці в години «пік»;
- 2) нерівномірність розподілу пасажиропотоків за годинами доби і ділянками маршруту;
- 3) інтервал руху автобусів за годинами доби;
- 4) дорожні умови руху автобусів і пропускну здатність вулиць;
- 5) провізну здатність, тобто максимальну кількість пасажирів, яка може бути перевезена автобусами за 1 годину в одному напрямку;
- 6) собівартість автобусних перевезень.

Для будь-якої пасажирської транспортної мережі потрібно визначати місткість рухомого складу для критичних (пікових) навантажень, що визначається в результаті обстеження пасажиропотоків. Результати обстеження пасажиропотоків використовують як для покращення організації перевезень пасажирів на діючих маршрутах, так і для вдосконалення організації транспортної мережі в цілому. За матеріалами обстеження можна встановити і основні техніко-експлуатаційні показники роботи автобусів: обсяги перевезень, пасажирообіг, середню дальність поїздки пасажирів, наповненість автобусів та їх кількість на маршруті, тривалість рейсу, пробіг за тривалість перебування в наряді.

Методи обстеження класифікуються за рядом ознак [4]:

1. За тривалістю охоплюваного періоду: систематичні (щодня, щотижня тощо), разові (короткочасні).

2. За шириною охоплення: суцільні (одночасно по всій транспортній мережі обслуговуваного району) в середньому один раз на три роки; вибіркові (за окремими районами руху) один раз на квартал.

3. За видом:

- а) анкетний метод (методом заповнення заздалегідь розроблених спеціальних анкет опитування);
- б) звітно-статистичний метод ґрунтується на квитково-облікових листах і кількості проданих квитків;

в) талонний метод (методом видачі обліковцям спеціально заготовлених талонів різних кольорів);

г) табличний метод (проводиться обліковцями всередині салону автобуса біля кожних дверей, методом заповнення наперед заготовлених таблиць);

д) візуальний або окомірний метод (методом збору даних на маршрутах із значним пасажирообміном, проводиться візуально за бальною системою від 1 до 5 балів). Ним можуть користуватися водії або кондуктори;

е) силуетний метод – різновид візуального (за п'ятибальною системою, методом набору силуетів за типами автобусів);

є) метод опитування – опитуванням обліковцем пасажирів у салоні автобуса, цей метод дозволяє визначити дані про кореспонденцію пасажирів.

4. Методи автоматизованого обстеження [10]:

а) безконтактний метод ґрунтується на використанні фотоелементів (застосовується при обстеженні маршрутів науковцями «НИИАТ» [11]);

б) контактний метод базується на обліку пасажирів, що входять і виходять, за їх дією на контактні сходишки, пов'язані з дешифраторами.

Однак перед формуванням маршрутів обстеження пасажиропотоків практично не проводилось. Це й спричинило необґрунтований вибір транспортної системи м. Черкаси.

Висновки:

1. Доведено необхідність у науковому обґрунтуванні формування раціональної експлуатації та ефективного оновлення автобусного парку м. Черкаси.

2. Запропоновано оновлення автобусного парку м. Черкаси на основі сучасних тенденцій розвитку пасажирського транспорту, враховуючи такі моменти:

- для ефективної оптимізації автобусних маршрутів м. Черкаси, в першу чергу, необхідно виконати обстеження пасажиропотоків безконтактним методом протягом року, що дасть достовірні вихідні дані для розрахунків;

- нормування витрати палива міських автобусів слід проводити з урахуванням інтенсивності сучасних транспортних потоків, а не за стандартами часів СРСР;

- обов'язковими мають бути економічні розрахунки, що реально відображають термін окупності проекту та обґрунтовану вартість проїзду;

- для забезпечення раціональної експлуатації та коректування графіків руху міських автобусів необхідно один раз у три роки проводити контрольні обстеження пасажиропотоків;

- для підвищення інформативності роботи пасажирського транспорту на зупинках доцільно встановлювати інформаційні електронні табло для відображення графіків руху, в автобусах необхідно чітко оголошувати зупинки, дублюючи їх на електронному табло.

Список літератури

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року: за станом на 20 жовтня 2010 р. / Кабінет Міністрів України. Офіц. вид. – К. : Парлам. вид-во, 2010. – 38 с. – (Бібліотека офіційних видань).
2. Біліченко В. В. Інноваційні стратегії розвитку міського пасажирського транспорту у Вінниці / В. В. Біліченко, С. О. Романюк // Вісник Севастопольського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 6 (177). – С. 178–184.
3. Дмитрієв М. М. Удосконалення системи управління пасажирським транспортом загального користування м. Кременчук / М. М. Дмитрієв, М. М. Мороз // Вісник Севастопольського національного університету. – 2012. – № 6 (177). – С. 114–118.
4. Липенков А. В. О проведении обследования городских автобусных маршрутов с целью их последующего моделирования / А. В. Елисеєв, А. В. Липенков, О. А. Маслова // Автотранспортное предприятие. – 2012. – № 1. – С. 42–44.
5. Меркулов Е. А. Проектирование дорог и сетей пассажирского транспорта в городах : учеб. пособие для вузов / Е. А. Меркулов, Э. Я. Турчихин, Е. Н. Дубровин. – М. : Стройиздат, 1980. – 496 с.
6. Спирин И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом : справочное пособие / И. В. Спирин. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 413 с.
7. Босняк М. Г. Пасажирські автомобільні перевезення : навч. посіб. / М. Г. Босняк. – К. : Слово, 2009. – 272 с.
8. Доля В. К. Пасажирські перевезення : підручник / В. К. Доля. – Х. : Форт, 2011. – 504 с.
9. Vuchic V. R. Urban transit : operations, planning and economics / V. R. Vuchic. – John Wiley&sons, 2004. – 644 p.
10. Бойко Ю. О. Впровадження систем відеоспостереження для обліку пасажирів на

міських маршрутах / Ю. О. Бойко // Вісник НТУ «ХПІ» : наук.-виробн. зб. – № 22 (1131). – Харків, 2015. – С. 46–49.

11. Проведение обследований пассажирских потоков на основе средств автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://niiat.ru/service/%D0%BEbsledovanie-passazhiropotokov/>

References

1. Transport strategy of Ukraine on a period till 2020 : as of October, 20, 2010 (2010). Kyiv: Parlam. vyd-vo, 38 p. [in Ukrainian].
2. Bilichenko, V. V. and Romanyuk, S. O. (2012), Innovative strategies of the development of public passenger transport in Vinnytsya. *Visnyk Sevastopol's'kogo nacional'nogo universytetu im. V. Dallya*, 6 (177), pp. 178–184 [in Ukrainian].
3. Dmitriev, M. M. and Moroz, M. M. (2012), Improvement of control system by public passenger transport in Kremenchuk. *Visnyk Sevastopol's'kogo nacional'nogo universytetu im. V. Dallya*, 6 (177), pp. 114–118 [in Ukrainian].
4. Lipenkov, A. V., Eliseev, A. V. and Maslova, O. A. (2012), About the survey work of inspections of city bus routes with the purpose of their subsequent design. *Avtotransportnoye predpriyatiye*, (1), pp. 42–44 [in Russian].
5. Merkulov, E. A., Turchikhin, E. Ya. and Dubrovin, E. N. (1980), Planning of roads and networks of passenger transport in cities. Moscow: Stroyizdat, 496 p. [in Russian].
6. Spirin, I. V. (2006), Passenger transportations in public transport. Moscow: IKTs «Akademkniga», 413 p. [in Russian].
7. Bosnyak, M. G. (2009), Passenger motor-car transportations. Kyiv: Slovo, 272 p. [in Ukrainian].
8. Dolya, V. K. (2011), Passenger transportations. Kharkiv: Fort, 504 p. [in Ukrainian].
9. Vuchic, V. R. (2004), Urban transit: operations, planning and economics. John Wiley&sons, 644 p.
10. Boyko, Yu. O. (2015), Introduction of video supervision systems for accounting the amount of passengers on city routes. *Visnyk Nacional'nogo tehnikhnogo universytetu "Harkivs'kyj politehnikhnij instytut"*, 22 (1131). Kharkiv, pp. 46–49 [in Ukrainian].
11. The survey work of inspections of passenger flows on the basis of automation facilities, available at: <http://niiat.ru/service/%D0%BEbsledovanie-passazhiropotokov/>

O. M. Pilipenko¹, *Dr.Tech.Sc., professor,*

D. P. Ruban¹, *Ph.D., associate professor,*

e-mail: ruban_dimon@mail.ru

H. Ya. Ruban², *lecturer*

e-mail: ganna-gaivoronsk@mail.ru

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Cherkasy State Business College
Chornovil str., 243, Cherkasy, 18028, Ukraine

GROUNDING OF RATIONAL USE AND REPLACEMENT OF BUS PARK IN CHERKASY CITY

Disparity of the work of city bus transportations in Cherkasy to modern trends of transport infrastructure development and European standards is set. A necessity for scientific grounding of rational use and effective replacement of bus park in Cherkasy city is proven.

The replacement of bus park in Cherkasy based on modern trends of transport infrastructure development is offered. For effective optimization of bus routes, first of all, it is necessary to inspect passenger flows by non-contact method for a year, that will give a reliable basic information for calculations.

Rationing of fuel consumption of city buses should be made taking into account the intensity of modern transport flows. Economic calculations which really represent the payback period of the project and grounded fare must be obligatory. For providing of rational use and adjustment of displacement-time diagrams of city buses it is necessary once in three years to conduct control inspections of passenger flows. To increase informative capability of passenger transport work it is expedient to set informative electronic boards for the reflection of displacement-time diagrams, and in busses it is necessary to announce stops with their duplication on an electronic board.

Keywords: *city, transport system, transport strategy, bus, passenger flows, rational structure, efficiency of transportations.*

Рецензенти: Г. В. Канашевич, д.т.н., професор,

О. О. Серьогін, д.т.н., професор

В. М. Манько, к.т.н., доцент,

e-mail: mankovm@ukr.net

В. М. Зотов, аспірант

e-mail: zotov_vetal@ukr.net

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПРИНЦИПИ ПРОГНОЗУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ОПОРУ СИСТЕМ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН ТА КОМПЛЕКСІВ

У статті запропоновано математичну модель визначення параметрів розподілу пробивної напруги та імовірності безвідмовної роботи системи ізоляції електричних машин поліграфічних комплексів. Проведено аналіз зміни опору ізоляції залежно від умов навколишнього середовища та навантаження електропривода поліграфічних машин.

Ключові слова: надійність, електродвигун, ізоляція, електропривід, пробивна напруга, полімерні матеріали.

Вступ. Однією з основних задач при вивченні надійності систем електричної ізоляції і при розробці методів прогнозування надійності є створення математичних моделей, адекватних імовірним процесам функціонування досліджуваної системи ізоляції.

Математична модель надійності — це математичний вираз, який пов'язує значення фізичних параметрів системи діючих навантажень та імовірність безвідмовної роботи системи. Відомо, що математична модель відображає тільки ступінь нашого пізнання діючого механізму функціонування системи, тому математична модель є лише деяким наближенням до досліджуваного процесу. Процес розробки математичної моделі полягає не тільки в теоретичній розробці будь-якої гіпотези про реальну поведінку об'єкта, а й у постійній перевірці відповідності прийнятої гіпотези і наявності статистичних даних, отриманих в результаті проведення дослідів [1, 3, 4].

Систему ізоляції з точки зору надійності необхідно представити як систему, що складається із послідовно з'єднаних елементів. Як елемент можна розглядати визначену довжину міжвиткової ізоляції, елементарну площину корпусної ізоляції та ін. Такий елемент в початковому стані буде мати деяке розподілення ймовірностей пробивної напруги, що залежить від застосованих матеріалів, техно-

логії [5, 6]. В процесі експлуатації системи ізоляції під дією зовнішніх факторів і навантаження розподілення ймовірностей пробивної напруги елемента буде змінюватись. Прикладена до системи ізоляції напруга також має деяке розподілення ймовірностей, практично вона не буде змінюватись при експлуатації системи ізоляції [2, 7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки ряд дослідників, що займалися математичним моделюванням надійності систем ізоляції електричних машин, застосовуючи принцип «чорного ящика», вирішили такі задачі:

1. Порівняння матеріалів, що застосовуються в системі ізоляції. Системи ізоляції, виготовлені з різних матеріалів, мають різну ймовірність безвідмовної роботи, тому можуть порівнюватися з допомогою кількісної характеристики;

2. Можна також порівнювати і технологічні процеси виготовлення систем ізоляції, тому що при різній технології створюється і різна дефектність елементарних ділянок;

3. На основі аналітичної залежності ймовірності безвідмовної роботи системи ізоляції від часу можна розробити методи прискорених випробувань;

4. При відомому розподіленні прикладених напруг можна оцінити кількісну придат-

ність системи ізоляції для використання в кожному конкретному електрообладнанні.

Крім зазначених переваг моделей, побудованих на принципі «чорного ящика», вони мають і деякі недоліки. Одним із недоліків є те, що параметром, який визначає надійність системи ізоляції, вибрано пробивну напругу, яка є деякою інтегральною характеристикою матеріалу. Визначення розподілення пробивної напруги з необхідною точністю є досить складною і трудомісткою задачею, яка пов'язана з використанням великої кількості зразків. Оскільки відсутні методи обліку, експеримент з визначення розподілу пробивної напруги слід проводити на діючих зразках, а це незручно [5, 6, 7].

Постановка завдання дослідження: встановити залежність параметрів розподілу пробивної напруги від часу дії експлуатаційних факторів. Ця залежність може бути записана у вигляді полінома. Знаючи цю формулу, можна визначити параметри розподілу пробивної напруги в будь-який момент часу, а це означає, що за допомогою математичної моделі можна розрахувати і ймовірність безвідмовної роботи системи ізоляції в той же момент часу. Цей шлях може бути застосований для тих систем ізоляції, які дозволяють накопичити достатній експериментальний матеріал.

Мета роботи: побудувати математичну модель визначення параметрів розподілу пробивної напруги та ймовірності безвідмовної роботи системи ізоляції залежно від навантаження та умов навколишнього середовища електродвигунів поліграфічних комплексів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Позначимо через $U(t)$ пробивну напругу в момент часу t . Зміна $U(t)$ в часі обумовлюється як зовнішнім фактором, так і фізичними процесами, що проходять у самій системі ізоляції. Також реалізація $U(t)$ залежить від початкового стану системи ізоляції, наприклад від технології виготовлення.

Введемо припущення, що залежність пробивної напруги від часу лінійна, тоді:

$$U(t) = \alpha t + \beta. \quad (1)$$

Для кожного елемента зміна $U(t)$ має не випадковий характер. Випадковість у зміні $U(t)$ полягає в тому, що коефіцієнт α в рівнянні (1) є випадковою величиною, що визнача-

ється початковим станом елемента, а це означає, що α є швидкістю зміни $U(t)$:

$$\alpha = \frac{dU(t)}{dt} = \varphi(t). \quad (2)$$

Швидкість зміни параметра можна представити у вигляді

$$\varphi(t) = V(t)\rho(t), \quad (3)$$

де $V(t)$ – функція зміни часу;

$\rho(t)$ – випадковий процес.

Середнє значення процесу $\rho(t)$ є величиною постійною і дорівнює 1, $M\{\rho(t)\} = 1$.

При цьому математичне очікування швидкості $\varphi(t)$ задається рівнянням

$$M\{\varphi(t)\} = V(t). \quad (4)$$

Знос, що накопичується до моменту часу t , може бути записаний у вигляді $U(0) - U(t)$, де $U(0)$ – пробивна напруга в початковий момент часу. Він дорівнює інтегралу від швидкості зносу і може бути записаний у вигляді

$$U(0) - U(t) = \int_0^t \varphi(x) dx. \quad (5)$$

Математичне очікування зносу є інтегралом від математичного очікування швидкості зносу:

$$M\{U(0) - U(t)\} = \int_0^t M\{\varphi(x)\} dx = \int_0^t V(x) dx. \quad (6)$$

Якщо в $V(t)$ ввести постійні a і b , то $V(t) = \frac{a}{b+t}$, а математичне очікування зносу буде визначено рівністю

$$M\{U(0) - U(t)\} = a[\ln(b+t) - \ln b]. \quad (7)$$

Як видно із рівняння (7), знос в середньому зростає як логарифм часу, таке значення спостерігається і для систем ізоляції.

При врахуванні припущень, що середня швидкість зносу постійна, початкова якість елементів однакова, в цьому випадку можна показати, що час безвідмовної роботи буде мати гамма-розподіл

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r \tau^{r-1} e^{-\lambda\tau}, \quad (8)$$

де r і λ – постійні параметри;

$\Gamma(\tau)$ – гамма-функція, визначається за формулою

$$\Gamma(r) = \int_0^\infty x^{r-1} e^{-x} dx. \quad (9)$$

Якщо поетапне накопичення пошкоджень не є прямою причиною відмови, а приводить лише до збільшення її ймовірності, то час безвідмовної роботи розподілу за законом Вейбулла

$$\varphi(\tau) = e^{-\tau\gamma/\beta} \tau^{\gamma-1}, \quad (10)$$

де β і γ – постійні параметри.

Постійні параметри у формулах (8) і (10) визначаються в результаті експерименту.

Зміна опору ізоляції електричної машини в процесі роботи електроприводу проходить за експоненціальним законом:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R_{уст.}}{T_c} - \frac{R}{T_c}, \quad (11)$$

де $R_{уст.}$ – опір ізоляції асинхронного електродвигуна при повністю висушеній обмотці, МОм;

T_c – постійна часу зміни опору в процесі роботи електродвигуна під навантаженням, год.

Постійна часу T_c залежить від коефіцієнта завантаження електродвигуна, вологості і температури повітря. На рис. 1 при проведенні залежності T_c від вологості W при різних навантаженнях привода (для кривих групи I струм $I = 0,8I_H$; II струм $I = I_H$; III струм $I = 1,5I_H$) і температури повітря (для верхніх кривих в групах I, II, III $\theta = 0^\circ\text{C}$, середніх – 20°C і нижніх – 35°C) для асинхронних електродвигунів серій 4A(a) і 4AM(б).

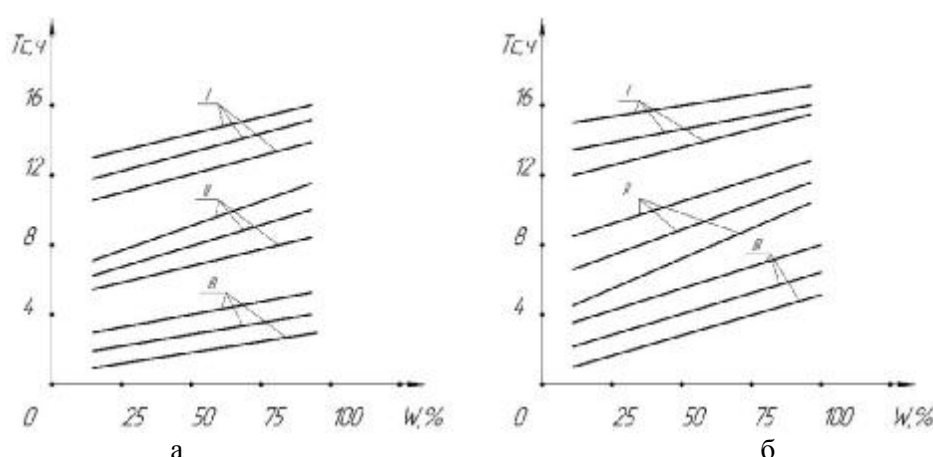


Рис. 1. Залежність постійних часу зміни опору ізоляції електродвигунів серій 4A(a), 4AM(б).
I – $0,8I_H$; II – I_H ; III – $1,5I_H$

На поліграфічних виробництвах дуже різні завантаження електродвигунів, час їх роботи, температура і вологість навколишнього середовища. Щоб обґрунтувати періодичність і час сушіння ізоляції, необхідно вивчити вплив цих факторів при різних їх значеннях на зміну опору. Провести вимірювання опору ізоляції на діючому електрообладнанні недоцільно через велику тривалість дослідів і значних затрат праці.

Тому побудуємо математичну модель зміни опору ізоляції асинхронного електродвигуна серії 4AM.

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{ra} \\ U_{r\beta} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{sa} + \frac{d}{dt}L_{sa} & \frac{d}{dt}M \\ \frac{d}{dt}M & r_{ra} + \frac{d}{dt}L_{ra} \\ -M\omega_r & -L_{ra}\omega_r \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

рівняння електромагнітного моменту:

$$M_{ел} = M(i_{s\beta}i_{r\alpha} - i_{sa}i_{r\beta}), \quad (13)$$

Для цього поєднаємо вирази (10) і (11) з математичними виразами, що описують електромеханічні процеси в електроприводі поліграфічних машин та комплексів. Електричні машини всіх основних типів приводяться до узагальненої електричної машини (рис. 2). Тут $\omega_{sa}, \omega_{s\beta}$ – кількість витків обмотки статора по осях α і β ; $\omega_{ra}, \omega_{r\beta}$ – кількість витків обмотки ротора по осях α і β ; $U_{sa}, U_{s\beta}, U_{ra}, U_{r\beta}$ – відповідно напруга по осях α і β на статорі і на роторі; ω_r – кутова швидкість ротора.

Для узагальненої електричної машини справедливі рівняння напруги:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_{r\beta}\omega_r & M\omega_r \\ r_{r\beta} + \frac{d}{dt}L_{r\beta} & \frac{d}{dt}M \\ \frac{d}{dt}M & r_{r\beta} + \frac{d}{dt}L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{ra} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

рівняння руху:

$$\int \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c = M_{ел} \quad (14)$$

В цих рівняннях $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ – відповідно напруга і струм в обмотках статора і ротора по осях α і β ; $r_{s\alpha}$, $r_{s\beta}$, $r_{r\alpha}$, $r_{r\beta}$ – активний опір обмоток статора і ротора; M – взаємна індуктивність; $L_{s\alpha}$, $L_{s\beta}$, $L_{r\alpha}$, $L_{r\beta}$ – індуктивність обмоток статора і ротора по осях α і β .

В електричних машинах момент опору M_c є зазвичай постійним, в електромеханічних системах – змінюється в часі. Системи рівнянь електричних машин відрізняються від систем рівнянь інших електротехнічних пристроїв наявністю рівняння електромагнітного моменту $M_{ел}$.

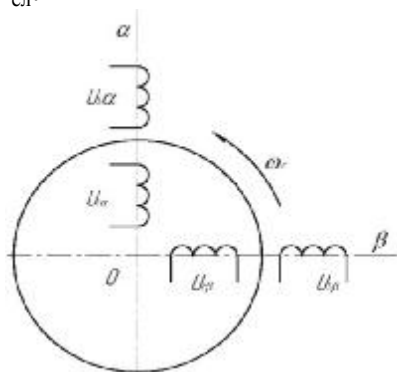


Рис. 2. Просторова модель узагальненої електричної машини

Отже, при поєднанні виразів (10), (11), (12) отримаємо систему рівнянь у диференціальній формі:

$$\begin{aligned} PS &= \frac{1}{T_{ел}} M_c - \frac{1}{T_{ел}} M_2; \\ M_2 &= \frac{60}{2\pi n_1} \cdot \frac{1}{1-S} P_2; \\ P_2 &= P_{ем} - P_{M2} - P_{Мх} - P_d; \\ P_{M2} &= S P_{ем}; \\ P_{M1} &= \frac{R_1}{R_2} P_{M2}; \\ PM &= 2M_K \omega_1 S - S_K \omega_1 M; \\ P_{ем} &= M \frac{2\pi n_1}{60}; T_e = \varphi(I, W, Q); \\ \frac{dR}{dt} &= \frac{R_{уст}}{T_c} - \frac{R}{T_c}; \frac{dR}{dt} = \frac{R}{T_y}; \\ T_{ем} &= \omega_1 j_{пр}; R_1 = (1 + \frac{x_1}{x_0}) r_1; \\ R_2 &= (1 + \frac{x_1}{x_0})^2 r_2; I_1 = \varphi(P_{M1}), \end{aligned} \quad (15)$$

де M_c – момент опору, Нм; P_2 – потужність, Вт; M_2 – момент опору, Нм, на валу електродвигуна; $P_{ем}$ – електромагнітна потужність,

Вт; M – момент електродвигуна, Нм; S – магнітне ковзання електродвигуна; I_1 – сила струму електродвигуна, А; $P_{Мх}$ і P_d – механічні і додаткові втрати в електродвигуні, Вт; P_{M1} і P_{M2} – втрати в міді статора і ротора, Вт; ω_1 – кутова швидкість обертання поля, рад/с; n_1 – синхронна частота обертання двигуна, хв⁻¹; $j_{пр}$ – приведений до валу двигуна момент інерції привода, Н^м/с²; M_K – критичний момент двигуна, Нм; r_1 і r_2 – активний опір обмотки ротора і приведений опір обмотки статора, Ом; x_1 і x_0 – індуктивні опори розсіювання статора і взаємодукції, Ом.

Розв'язок цієї системи рівнянь при заданих значеннях навантаження, часу роботи електроприводу на добу, параметрах мікроклімату дозволяє встановити характер зміни опору ізоляції двигуна даного виконання.

Імовірність пробивної напруги міжвиткової ізоляції розподілена за законом розподілення мінімальної кількості із більшої кількості незалежних випадкових величин розподілення Вейбулла. Для проведення розрахунку надійності міжвиткової ізоляції обмоток потрібно знати закон розподілення ймовірностей пробивних напруг у будь-який момент часу. Якщо прийняти припущення, що цей закон в процесі експлуатації не змінюється, а змінюються його параметри, то необхідно визначити функції $U_0 = f(t)$ при заданих умовах експлуатації. Наближено їх можна визначити шляхом проведення багатофакторного експерименту. Для цього досліджують вплив температури обмоток електродвигуна, частоти пусків, рівень вібрації, кількість годин роботи на добу. При побудові моделі надійності системи ізоляції бажано враховувати фізичні властивості полімерних матеріалів. Полімерні матеріали в конструкції піддаються статичним і динамічним механічним навантаженням.

З урахуванням характеру деформації полімери можуть бути умовно розділені на три групи:

- 1) жорсткі полімери, що проявляють малі деформації і мають великий модуль пружності;
- 2) еластичні полімери, здатні до дуже великих зворотних деформацій;
- 3) полімери, що виявляють текучість при дії зовнішніх сил.

Руйнування полімерів являє собою процес, що розвивається в часі. Воно пов'язане з

розривом ланцюгових макромолекул по хімічних зв'язках. Механічні навантаження скорочують термін служби полімерних матеріалів. Тому розвантаження полімерів у конструкціях, раціональне конструювання систем електричної ізоляції мають велике значення в підвищенні якості ізоляції. Ця різниця в довговічності навантажених і ненавантажених полімерів повинна враховуватись і при розробці методів випробувань.

Досвід експлуатації показує, що робоздатність ізоляції у виробі значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів. Більше того, якщо електричні навантаження діють на електричну ізоляцію тільки в період роботи виробу, то механічні навантаження і, в першу чергу, внутрішні напруження діють на ізоляцію як у період роботи виробу, так і в період відключення від мережі. Вони виникають у полімерних матеріалах у процесі виготовлення виробу і діють у ньому протягом його існування, в тому числі під час транспортування, зберігання та монтажу.

Недооцінка важливості внутрішніх напружень і недостатнє урахування механічних навантажень на полімерні матеріали в конструкціях призводять до погіршення експлуатаційних властивостей ізоляції, зниження її надійності.

Для оцінювання деформаційних властивостей полімерних матеріалів необхідно знати рівноважний модуль пружності (модуль Юнга) і коефіцієнт поперечної деформації (коефіцієнт Пуассона).

Зносостійкі властивості оцінюються по короткочасній границі міцності і характеризуються температурно-часовою залежністю.

Висновки. На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що:

1. Побудована математична модель дає можливість прогнозувати та визначити параметри розподілу величин пробивної напруги залежно від зміни стану опору ізоляції електричних машин поліграфічних комплексів, що на 20 % зменшує терміни проведення сушіння ізоляції.

2. Встановлена залежність зміни стану опору ізоляції електричних машин від умов навколишнього середовища та навантаження привода поліграфічних машин: при збільшен-

ні вологості на 25 % стан ізоляції погіршується на 10 %.

3. Застосування цього методу при конструюванні та дослідженні систем електричної ізоляції дозволяє більш правильно вибрати електроізоляційні матеріали для використання в конкретних системах ізоляції різних типів виконання електродвигунів.

Список літератури

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – [Чинний від 01-01-1996]. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 96 с.
2. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов. Основні положення. – [Чинний від 01-01-1999]. – К. : Держспоживстандарт України, 1997. – 98 с.
3. Ванев Б. Н. Надежность асинхронных электродвигателей. – К. : Техника, 1983. – 142 с.
4. Горбунов А. П. Комплексный подход к оценке надежности электрических машин / А. П. Горбунов, О. Д. Гольдберг, Э. Б. Иртыхский // Электричество. – 1984. – № 5. – С. 52–54.
5. Петров Т. А. Обоснование периодичности технического обслуживания и ремонта электродвигателей с учетом их эксплуатационной надежности : автореф. дис. к.т.н. / Т. А. Петров. – Челябинск, 1983. – 24 с.
6. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
7. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем / А. Г. Ивахненко. – К. : Высшая школа, 1987. – 63 с.
8. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин / В. М. Манько // Автошляховик України. – Вип. 2. – Київ, 2001. – С. 48–53.
9. Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
10. Томашівський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашівський. – К. : Видав. група ВНУ, 2005. – 352 с.
11. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве

- / Н. А. Корчемный, В. П. Машевский. – К. : Урожай, 1988. – 176 с.
12. Друкарське устаткування : підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів : УАД, 2005. – 468 с.
- References**
1. DSTU 2860-94 (1994), Engineering reliability. The terms and definitions [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 96 p. [in Ukrainian].
 2. DSTU 3433-96 (1997), Models of failures. Substantive provisions [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 98 p. [in Ukrainian].
 3. Vaneev, B. N. (1983), The reliability of induction motors. Kiev: Tehnika, 142 p. [in Russian].
 4. Gorbunov, A. P., Gol'dberg, O. D. and Irtyshskij, Je. B. (1984), An integrated approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, (5), pp. 52–54 [in Russian].
 5. Petrov, T. A. (1983), Justification of the frequency of maintenance and repair of electric motors with regard to their operational reliability: avtoref. dis. k.t.n. Cheljabinsk, 24 p. [in Russian].
 6. Kopylov, I. P. (2001), Mathematic modeling of electric motors. Moscow: Vysshaja shkola, 327 p. [in Russian].
 7. Ivahnenko, A. G. (1987), Modeling of complex systems. Kiev: Vysshaja shkola, 63 p. [in Russian].
 8. Man'ko, V. M. (2001), Universal stand for diagnosing and testing of electric machines. *Avtoshlyahovyk Ukrayiny*, (2), Kyiv, pp. 48–53 [in Ukrainian].
 9. Kostynyuk, L. D., Moroz, V. I. and Paranchuk, Ja. S. (2004), Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'vivs'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
 10. Tomashyvs'kyi, V. M. (2005), Systems modeling. Kyiv: Vydav. grupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].
 11. Korchemnyy, N. A. and Mashevskyy, V. P. (1988), Improvement of electrical equipment reliability in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
 12. Chehman, Ja. I., Senkus', V. T., Didych, V. P. and Bosak, V. O. (2005), Printing equipment. L'viv, 468 p. [in Ukrainian].

V. M. Manko, Ph.D., associate professor,
e-mail: mankovm@ukr.net

V. M. Zotov, postgraduate student
e-mail: zotov_vetal@ukr.net

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

PRINCIPLES OF FORECASTING AND MATHEMATICAL MODELING OF THE CHANGE OF RESISTANCE OF INSULATION SYSTEMS IN ELECTRIC MOTORS OF PRINTING MACHINES AND COMPLEXES

The creation of mathematical models adequate to the probable processes of functioning of the investigated insulation system is one of the main tasks when studying the reliability of electrical insulation systems and at developing the methods for predicting the reliability. Mathematical model reflects only the degree of our knowledge of the existing mechanism of system functioning, so it is only some approximation to the investigated process. The process of developing a mathematical model lies not only in theoretical development of any hypotheses about the actual behavior of the object, but in a constant verification of the conformity of adopted hypothesis and the availability of statistical data obtained by conducting experiments.

The paper proposes a mathematical model to determine the distribution of the breakdown voltage and the reliability function of the insulation system of electrical machines printing systems. Operating experience has shown that the insulation performance of the product largely depends on physical-mechanical properties of polymeric materials. Moreover, if electrical loads operate on electrical

insulation only within the period of performance of the product, mechanical loads and, firstly, internal voltage act on the insulation both in the period of operation and disconnecting from the network. They occur in polymeric materials during the process of product manufacturing and act in it throughout its existence, including the periods of transportation, storage and installation.

Underestimation of the importance of internal stresses and insufficient consideration of mechanical loads on polymer materials in constructions lead to deterioration of operational properties of the insulation, reducing its reliability. Wear resistant properties are measured by short-term tensile strength and are characterized by time-temperature dependence. Destruction of polymers is a process developing in time. It is associated with rupture of the chain of macromolecules by chemical bonds. Mechanical loads reduce the service life of polymeric materials, therefore, unloading of polymers in the structures, rational design of electrical insulation systems are of great importance in improving the quality of the insulation.

The analysis of changes in insulation resistance depending on the ambient conditions and the load of the drive of printing machines and complexes is made.

Keywords: *reliability, electric motor, insulation, electric drive, breakdown voltage, polymeric materials.*

Рецензенти: *В. І. Осипенко, д.т.н., професор,
 С. В. Поздєєв, д.т.н., професор*

Т. В. Воробкало, к.т.н., доцент,

О. С. Гавриш, к.ф.-м.н., доцент,

О. І. Андрієнко, студент

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ СПІЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДОППЛЕРІВСЬКОГО ЗСУВУ ЧАСТОТИ ТА ПАРАМЕТРІВ АСИМЕТРИЧНОЇ ЗАВАДИ

В роботі синтезовано алгоритми спільного оцінювання частоти Допплера та статистичних характеристик асиметричної негауссівської завади: дисперсії та коефіцієнта асиметрії. Показано, що отримані оцінки частоти Допплера відрізняються підвищеною точністю завдяки врахуванню негауссівського характеру завади. На основі отриманих алгоритмів можливо будувати пристрої вимірювання частоти Допплера при апріорно невідомих статистичних параметрах негауссівської завади, які будуть відрізнятися підвищеною точністю.

Ключові слова: частота Допплера, негауссівська завада, асиметрична завада, оцінка параметра, метод максимізації полінома, дисперсія, коефіцієнт асиметрії.

Вступ. Одним із важливих параметрів руху, що підлягають визначенню в радіосистемах, є швидкість (радіальна складова швидкості руху і кутова швидкість переміщення об'єкта). В РЛС для визначення радіальної та кутової швидкості використовується ефект Допплера – зміна частоти електромагнітних коливань, що приймаються, при зміні відстані між приймачем і випромінювачем корисного сигналу. Вимірювання радіальної швидкості руху об'єкта зводиться до вимірювання доплерівського зсуву частоти сигналу, що приймається, а вимірювання кутової швидкості руху об'єкта зводиться до вимірювання різниці доплерівських частот сигналів, прийнятих двома рознесеними антенами [1].

Задача визначення доплерівського зсуву частоти має статистичний характер, тому що корисний сигнал завжди приймається в присутності завад, і зводиться до оцінювання параметрів прийнятої випадкової величини.

У більшості робіт частота Допплера оцінюється в присутності ідеалізованих гауссівських завад [2–4], але на практиці характер розподілу завад відрізняється від гауссівського, тобто завади є негауссівськими. Проте негауссівські завади охоплюють широкий клас завад і є малодослідженими. Відповідно до степеня близькості до гауссівських завад негауссівські поділяються на асиметричні, ексцесні та асиметрично-ексцесні [5]. У цій роботі обмежимося розглядом впливу на корисний сигнал асиметричних завад.

Найбільш ефективним методом знаходження оцінок параметрів негауссівської випадкової величини є метод максимізації полінома, запропонований професором Ю. П. Кунченком, який базується на використанні степеневих стохастичних поліномів [6, 7].

Найпростіший випадок оцінювання – частота Допплера, коли статистичні характеристики завади відомі спостерігачу. Але на практиці зазвичай ці характеристики невідомі. Тому актуальною є задача знаходження спільної оцінки частоти Допплера та статистичних характеристик завади.

Постановка задачі. Будемо вважати, що взаємодія корисного сигналу і завади є адитивною, тоді випадкова величина, що спостерігається, буде мати вигляд

$$\xi_v = S_v + n_v, v = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Як корисний сигнал розглянемо гармонічний сигнал, математична модель якого має вигляд

$$S_v = a_0 \cos[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0], \quad (2)$$

де a_0, f_0, φ_0 – амплітуда, частота і початкова фаза гармонічного сигналу, Δ – шаг дискретизації. Невідомим параметром прийнятого гармонічного сигналу будемо вважати частоту Допплера f_d , а всі інші параметри сигналу – відомі.

У цій роботі обмежимося розглядом асиметричної завади першого типу першого виду $n_{(p)}$ з нульовим математичним сподіванням $En_{(p)} = 0$, дисперсією χ_2 і коефіцієнтом асиметрії γ_3 .

Нехай з випадкової величини ξ_v виду (1) береться вибірка $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ об'ємом n , при обробці якої необхідно знайти оцінку частоти Допплера спільно зі статистичними характеристиками завади.

Згідно з методом максимізації полінома, в загальному випадку, оцінка векторного параметра $\bar{g}$ випадкової величини ξ_v знаходиться з розв'язку системи рівнянь максимізації полінома [8]

$$\sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{iv(m)}(\bar{g}) [x_v^i - m_{iv}(\bar{g})] \Big|_{\bar{g}=\hat{\bar{g}}} = 0, \quad (3)$$

де $\overline{m=1, g}$, g – кількість параметрів, що підлягають оцінюванню, s – ступінь стохастичного полінома, $m_{iv}(\bar{g})$ – початкові моменти, $h_{iv(m)}(\bar{g})$ – оптимальні вагові коефіцієнти, що знаходяться з розв'язку системи рівнянь

$$\sum_{j=1}^s h_{jv(m)}(\bar{g}) F_{(i,j)v}(\bar{g}) = \frac{\partial}{\partial g_m} m_{iv}(\bar{g}),$$

$$i = \overline{1, s}, \quad v = \overline{1, n},$$

де $F_{(i,j)v}(\bar{g}) = m_{(i+j)v}(\bar{g}) - m_{iv}(\bar{g}) \cdot m_{jv}(\bar{g})$ – центровані корелянти.

Для дослідження точності оцінок векторного параметра векторної випадкової величини, отриманих методом максимізації полінома, використовується варіаційна матриця, яка дорівнює оберненій матриці кількості добутої інформації $J_{sn}(\bar{g})$ [9]

$$V_{sn}^{(g)}(\bar{g}_0) = J_{sn(g)}^{-1}(\bar{g}), \quad (4)$$

де елементи матриці $J_{sn(g)}^{(m,k)}(\bar{g})$, $m, k = \overline{1, g}$, знаходяться за формулою

$$J_{sn(g)}^{(m,k)}(\bar{g}) = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{jv(m)}(\bar{g}) \frac{\partial}{\partial g_m} m_{iv}(\bar{g}).$$

На головній діагоналі варіаційної матриці (4) розташовані дисперсії відповідних параметрів, що підлягають спільному оцінюванню.

Отже, метою роботи є синтез алгоритмів спільного оцінювання доплерівського зсуву частоти та параметрів асиметричної завади методом максимізації полінома і дослідження точності отриманих результатів.

Результати роботи. В роботі, відповідно до методу максимізації полінома, побудовані алгоритми оцінювання доплерівського зсуву частоти до четвертого степеня стохастичного полінома включно.

При першому степені полінома $s=1$ можливо знаходити оцінки тільки параметрів корисного сигналу, а рівняння максимізації полінома, з розв'язку якого знаходиться оцінка частоти Допплера, має вигляд

$$\sum_{v=1}^n v \Delta \sin[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0] x_v \Big|_{f_d=\hat{f}_d} = 0.$$

Алгоритм при першому степені полінома є оптимальним для випадку, коли завада є гауссівською. Перевагою цієї оцінки є простота її технічної та алгоритмічної реалізації і те, що для знаходження цієї оцінки не потрібно знати значення інших параметрів як сигналу (наприклад a_0), так і завади (наприклад χ_2 , γ_3).

Починаючи з другого степеня полінома, можливо знайти оцінку параметра χ_2 . Тому в роботі, використовуючи метод максимізації полінома, синтезовано алгоритми спільного оцінювання частоти Допплера та дисперсії завади при другому степені стохастичного полінома. Спільна оцінка знаходиться з розв'язку такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} 2\chi_2^{0.5} \sum_{v=1}^n x_v \sin[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0] + \\ + 2\gamma_3 a_0 \sum_{v=1}^n x_v \sin[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0] \times \\ \times \cos[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0] - \\ - \gamma_3 \sum_{v=1}^n x_v^2 \sin[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0] \Big|_{f_d=\hat{f}_d} = 0, \\ \sum_{v=1}^n (-\chi_2^{0.5} \gamma_3 - 2a_0 \cos[2\pi(f_0 + f_d)v\Delta + \varphi_0]) \cdot x_v + \\ + x_v^2 + 1/2a_0^2 - \chi_2 \Big|_{\chi_2=\hat{\chi}_2} = 0. \end{cases}$$

Оцінку коефіцієнта асиметрії можливо знайти, починаючи з третього степеня (тому

що вона входить в початкові моменти, починаючи з третього порядку). Тому при степенях $s = 3, 4$ синтезовано алгоритми для знаходження спільної оцінки трьох параметрів f_D, χ_2, γ_3 .

Отримані системи рівнянь є нелінійними і трансцендентними, тому для знаходження оцінок їх необхідно розв'язувати за допомогою чисельних методів [10].

В роботі досліджені точнісні характеристики отриманих оцінок. При $s = 1$ знайдено дисперсію оцінки параметра f_D

$$\sigma_{1n}^2 = \frac{3\chi_2}{a_0^2(\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)}. \quad (5)$$

З виразу (5) видно, що дисперсія оцінки частоти Доплера при $s=1$ залежить від параметра гармонічного сигналу a_0 , потужності завади χ_2 та об'єму вибірки n .

Оскільки при другому степені стохастичного полінома параметр, що оцінюється, є векторним, то для дослідження асимптотичних властивостей знаходимо варіаційну матрицю, яка має наступний вигляд:

$$V_{2n} = \frac{\Delta_2}{2\chi_2^2 n} \begin{pmatrix} \frac{3}{a_0^2(\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)} & 0 \\ 0 & \frac{2}{n} \end{pmatrix}.$$

На головній діагоналі матриці розташовані дисперсії частоти Доплера і асиметричної завади відповідно. Інші елементи матриці дорівнюють нулю. Це означає, що дисперсії параметрів f_D та χ_2 при спільному оцінюванні дорівнюють дисперсіям відповідних параметрів при окремому оцінюванні кожного параметра. При порівнянні дисперсій отриманих оцінок з дисперсіями оцінок, отриманих методом моментів [7], бачимо, що дисперсії оцінок будуть меншими в коефіцієнт зменшення дисперсії q_{21} і це зменшення залежить від коефіцієнта асиметрії

$$q_{21} = q_{21(f_D)} = q_{21(\chi_2)} = 1 - \frac{\gamma_3^2}{2}. \quad (6)$$

При $s = 2$ коефіцієнт зменшення дисперсії однаковий для параметрів f_D та χ_2 . На рис. 1 зображено графік залежності кое-

фіцієнта зменшення дисперсії від коефіцієнта асиметрії.

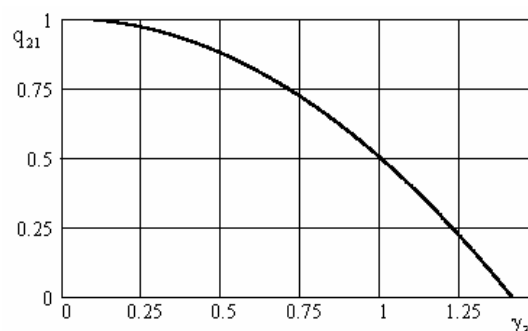


Рис. 1. Залежність q_{21} від γ_3 при $s = 2$

З графіка видно, якщо $\gamma_3 = 0$, то зменшення дисперсії не спостерігається. А при прямуванні коефіцієнта асиметрії до границі області визначення ($\pm 1,414$) дисперсії оцінок прямують до нуля.

Також у роботі досліджено асимптотичні властивості отриманих оцінок параметрів f_D, χ_2, γ_3 при третьому та четвертому степенях стохастичного полінома.

При $s = 3, 4$ варіаційна матриця має наступний вигляд

$$V_{sn}(\vec{g}) = \begin{pmatrix} V_{sn}^{(1,1)}(\vec{g}) & 0 & 0 \\ 0 & V_{sn}^{(2,2)}(\vec{g}) & V_{sn}^{(2,3)}(\vec{g}) \\ 0 & V_{sn}^{(3,2)}(\vec{g}) & V_{sn}^{(3,3)}(\vec{g}) \end{pmatrix}.$$

Оскільки елементи матриці $V_{sn}^{(1,2)} = V_{sn}^{(2,1)} = V_{sn}^{(1,3)} = V_{sn}^{(3,1)} = 0$, то можна зробити висновки, що при $s = 3, 4$ дисперсія оцінки частоти Доплера при сумісному оцінюванні зі статистичними характеристиками завади буде дорівнювати дисперсії оцінки при окремому оцінюванні цього параметра.

Дисперсія оцінки параметра f_D при $s = 3$ дорівнює

$$\sigma_{3n(f_D)}^2 = \frac{3\chi_2}{a_0^2(\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)} \times \left(1 - \frac{\gamma_3^2(2+3\gamma_3^2)}{2(2-3\gamma_3^2)} \right). \quad (7)$$

Порівнявши вираз (7) з виразом (5), бачимо, що дисперсія при $s = 3$ відрізняється коефіцієнтом

$$q_{31(f_d)} = 1 - \frac{\gamma_3^2(2 + 3\gamma_3^2)}{2(2 - 3\gamma_3^2)}. \quad (8)$$

Вираз (8) є коефіцієнт зменшення дисперсії оцінки частоти Допплера при $s = 3$ відносно дисперсії, коли оцінка знаходиться при $s = 1$, без урахування негауссівського характеру випадкової величини. Графік залежності $q_{31(f_d)}$ від коефіцієнтів асиметрії γ_3 зображений на рис. 2, з якого видно, що при прямуванні коефіцієнта асиметрії γ_3 до границі області допустимих значень ($\pm 0,6561$) досягається значне зменшення дисперсії оцінки параметра f_d .

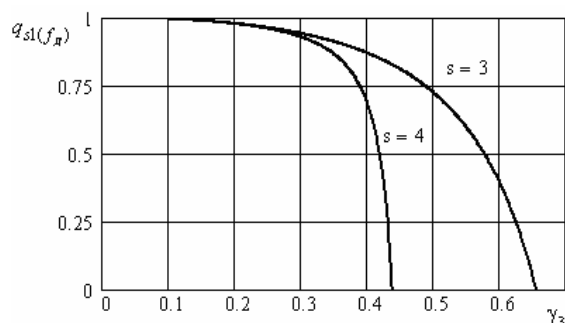


Рис. 2. Залежності коефіцієнтів $q_{s1(f_d)}$ від γ_3 при $s = 3, 4$

Аналогічно отримано дисперсію та коефіцієнт ефективності оцінки частоти Допплера при четвертому степені полінома

$$\sigma_{4n(f_d)}^2 = \frac{3\chi_2 q_{41(f_d)}}{a_0^2 (\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)},$$

$$q_{41(f_d)} = 1 - \frac{2\gamma_3^2(2 - 3\gamma_3^2 + 18\gamma_3^4)}{8 - 36\gamma_3^2 - 6\gamma_3^4 - 9\gamma_3^6}.$$

Графік залежності коефіцієнта ефективності від значень коефіцієнта асиметрії γ_3 при $s = 4$ зображений на рис. 2. З графіка видно, що спостерігається зменшення дисперсії, причому при $\gamma_3 \rightarrow \pm 0,4382$ (тобто при прямуванні γ_3 до межі допустимих значень) дисперсія оцінки прямує до нуля. Також з рис. 2 видно, що зі збільшенням степеня стохастичного полінома дисперсія оцінки зменшується.

Дисперсії оцінок параметрів χ_2 та γ_3 при $s = 3$ відповідно дорівнюють

$$\sigma_{3n(\chi_2)}^2 = \frac{2\chi_2^2}{n} \left(1 - \frac{\gamma_3^2}{2} \right),$$

$$\sigma_{3n(\gamma_3)}^2 = \frac{1}{n} (6 - 4,5\gamma_3^2 - 2,25\gamma_3^4).$$

Оскільки елементи варіаційної матриці $V_{sn}^{(3,2)}, V_{sn}^{(2,3)}$ не дорівнюють нулю, то дисперсії оцінок $\hat{\chi}_2$ та $\hat{\gamma}_3$ при спільному оцінюванні будуть більшими, ніж при їх окремому оцінюванні. При спільному оцінюванні цих параметрів методом моментів дисперсії оцінок параметрів χ_2 та γ_3 дорівнюють відповідно [7]

$$\sigma_{(\chi_2)1}^2 = \frac{\chi_2^2}{nr},$$

$$\sigma_{(\gamma_3)1}^2 = \frac{3}{nr} (5 + 3\gamma_3^2 - 7,5\gamma_3^4).$$

Тоді коефіцієнти ефективності для параметрів χ_2 та γ_3 будуть відповідно рівні

$$q_{31(\chi_2)} = 1 - \frac{\gamma_3^2}{2}, \quad (9)$$

$$q_{31(\gamma_3)} = 1 - \frac{3(4 + \gamma_3^4 + 4\gamma_3^2)}{2(10 - 9\gamma_3^2)}. \quad (10)$$

На рис. 3 зображено графік коефіцієнта зменшення дисперсій оцінки $\hat{\chi}_2$ (9), з якого видно, що при $\gamma_3 = 0$ дисперсія оцінки, знайдена методом максимізації полінома, дорівнює дисперсії оцінки, знайденої методом моментів, а при прямуванні коефіцієнта асиметрії до границі області визначення, дисперсія оцінки, знайденої методом максимізації полінома, зменшується і прямує до нуля.

На рис. 4 зображено графік коефіцієнта зменшення дисперсій оцінки $\hat{\gamma}_3$ (10). З графіка видно, що при спільному оцінюванні параметрів при $s = 3$ зменшення дисперсії оцінки $\hat{\gamma}_3$ має майже сталу величину у всій області допустимих значень, навіть при прямуванні коефіцієнта асиметрії до граничного значення 0,6561.

При четвертому степені стохастичного полінома дисперсія оцінки параметра χ_2 та коефіцієнт ефективності $q_{41(\chi_2)}$ дорівнюють відповідно

$$\sigma_{4n(\chi_2)}^2 = \frac{2\chi_2^2}{n} \left(1 - \frac{2\gamma_3^2 + 9\gamma_3^4}{4(1 + 6\gamma_3^2)} \right),$$

$$q_{4l(\chi_2)} = 1 - \frac{2\gamma_3^2 + 9\gamma_3^4}{4(1 + 6\gamma_3^2)}.$$

Графік залежності коефіцієнта ефективності $q_{4l(\chi_2)}$ від істинних значень коефіцієнта асиметрії γ_3 для четвертого степеня стохастичного полінома зображений на рис. 3, з якого видно, що при $s = 4$ дисперсія оцінки параметра χ_2 при сумісному оцінюванні параметрів f_D, χ_2, γ_3 методом максимізації полінома буде більшою, ніж при окремому оцінюванні потужності завади. Але все ж таки буде спостерігатися зменшення дисперсії оцінки $\hat{\chi}_2$ для асиметричної випадкової величини, яке залежить від коефіцієнта асиметрії γ_3 .

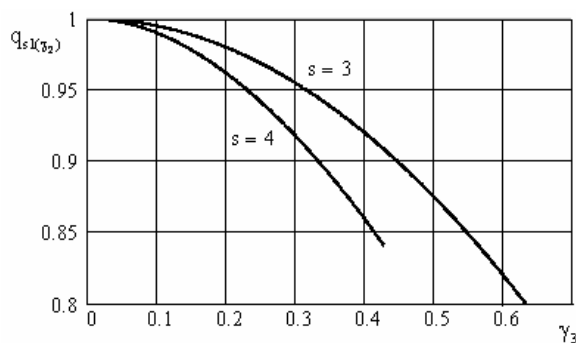


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів $q_{s1(\chi_2)}$ від γ_3 при $s = 3, 4$

Дисперсія оцінки параметра γ_3 та коефіцієнт ефективності дорівнюють відповідно

$$\sigma_{4n(\gamma_3)}^2 = \frac{1}{n} \left(\frac{6 - 22,5\gamma_3^2 - 2,25\gamma_3^4 - 16,875\gamma_3^6}{1 + 6\gamma_3^2} \right),$$

$$q_{4l(\gamma_3)} = 1 - \frac{9 + 121,5\gamma_3^2 + 33,75\gamma_3^4 + 151,875\gamma_3^6}{3(5 + 33\gamma_3^2 + 10,5\gamma_3^4 - 45\gamma_3^6)}.$$

Графік залежності $q_{4l(\gamma_3)}$ від γ_3 при $s = 4$ зображено на рис. 4. З графіка видно, що дисперсія оцінки коефіцієнта асиметрії γ_3 при сумісному оцінюванні методом максимізації полінома параметрів f_D, χ_2, γ_3 при четвертому степені стохастичного полінома може бути меншою, ніж при третьому степені полінома.

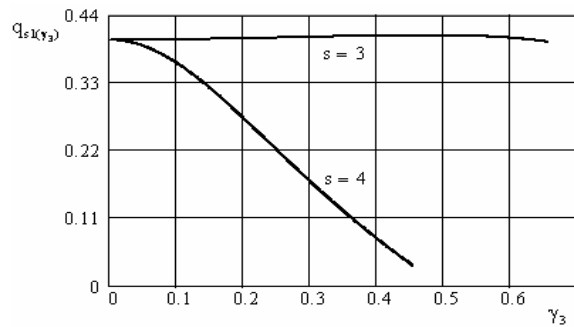


Рис. 4. Залежності коефіцієнтів $q_{s1(\gamma_3)}$ від γ_3 при $s = 3, 4$

Висновки. Алгоритми спільного оцінювання частоти Допплера зі статистичними характеристиками асиметричної завади, синтезовані з використанням методу максимізації полінома, будуть більш точними порівняно з класичними алгоритмами оцінювання відповідних параметрів. На основі отриманих у цій роботі результатів можна будувати більш точні пристрої для визначення частоти Допплера при невідомих статистичних характеристиках завади.

Список літератури

1. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю. Г. Сосулин. – М. : Радио и связь. 1992. – 303 с.
2. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Tam W. M. Digital communications with chaos: multiple access techniques and performance / W. M. Tam, F. C. M. Lau, C. K. Tse. – London : Elsevier, 2006. – 238 p.
4. Van Trees H. L. Detection, estimation, and modulation theory / H. L. Van Trees. – Part IV : Optimum array processing. – John Wiley, 2002. – 1470 p.
5. Кунченко Ю. П. Полиномиальные оценки параметров близких к гауссовским случайных величин. Часть 1. Стохастические полиномы, их свойства и применение для нахождения оценок параметров / Ю. П. Кунченко. – Черкасы : ЧИТИ, 2001. – 133 с.
6. Kunchenko Yu. Polynomial parameter estimations of close to Gaussian random variables / Yuriy Kunchenko. – Germany, Aachen : Shaker Verlag, 2002. – 396 p.

7. Кунченко Ю. П. Полиномиальные оценки параметров близких к гауссовским случайных величин. Часть 2. Оценка параметров близких к гауссовским случайных величин / Ю. П. Кунченко, С. В. Заболотный. – Черкассы : ЧИТИ, 2001. – 133 с.
8. Кунченко Ю. П. Применение метода максимизации полинома для оценки параметров сигналов, принимаемых многоэлементной антенной решеткой / Ю. П. Кунченко, Т. В. Воробкало // Радиофизика и электроника. – Том 7, № 2. – Харьков, 2002. – С. 415–418.
9. Воробкало Т. В. Асимптотичні властивості сумісної оцінки часу запізнення сигналу та статистичних характеристик негауссівської завади / Т. В. Воробкало, А. В. Гончаров // Радиоэлектроника и информатика (ХНУРЕ). – 2009. – № 1. – С. 15–19.
10. Воробкало Т. В. Методика знаходження наближеного розв'язку рівняння максимізації полінома / Т. В. Воробкало // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2008. – № 3. – С. 14–17.
- multiple access techniques and performance. London: Elsevier, 238 p.
4. Van Trees, H. L. (2002), Detection, estimation, and modulation theory. Part IV: Optimum array processing. John Wiley, 1470 p.
5. Kunchenko, Yu. P. (2001), Polynomial estimations of parameters of close to Gaussian random variables. Part 1. Stochastic polynomials, their properties and application for parameters estimations. Cherkassy: CHITI, 133 p. [in Russian].
6. Kunchenko, Yu. (2002), Polynomial parameter estimations of close to Gaussian random variables. Germany, Aachen: Shaker Verlag, 396 p.
7. Kunchenko, Yu. P. and Zabolotnyj, S. V. (2001), Polynomial estimations of parameters of close to Gaussian random variables. Part 2. Polynomial estimations of parameters of close to Gaussian random variables. Cherkassy : CHITI, 133 p. [in Russian].
8. Kunchenko, Yu. P. and Vorobkalo, T. V. (2002), Application of the method of polynomial maximization for estimation of signal parameters, received by multielement array. *Radiofizika i ehlektronika*, 7 (2). Har'kov, pp. 415–418 [in Russian].
9. Vorobkalo, T. V. and Goncharov, A. V. (2009), Asymptotic properties of simultaneous estimation signal lag time and statistic characteristics of non-Gaussian interference: *Radioelektronika i informatika* (HNURE), pp. 15–19 [in Ukrainian].
10. Vorobkalo, T. V. (2008), Methodology for finding of approximate solution of polynomial maximization equation. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (3), pp. 14–17 [in Ukrainian].

References

1. Sosulin, Yu. G. (1992), Theoretic bases of radiolocation and radionavigation. Moscow: Radio i svyaz', 303 p. [in Russian].
2. Shirman, Ya. D. and Manzhos, V. N. (1981), Theory and technology of radiolocation information processing against a background of interferences. Moscow: Radio i svyaz', 416 p. [in Russian].
3. Tam, W. M., Lau, F. C. M. and Tse, C. K. (2006), Digital communications with chaos:

T. V. Vorobkalo, *Ph.D., associate professor*,

O. S. Havrysh, *Ph.D., associate professor*,

O. I. Andriyenko, *student*

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF JOINT ESTIMATION OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT AND ASYMMETRIC INTERFERENCE PARAMETERS

In most papers, Doppler frequency is estimated in the presence of idealized Gaussian interferences. In practice, usually the character of interference distribution is non-Gaussian and unknown to researchers.

The purpose of the work is to synthesize algorithms of joint estimation of Doppler frequency shift and statistical characteristics of asymmetric non-Gaussian interference by the method of polynomial maximization and to study the accuracy of results. The basis of this method consists in the use of sedate stochastic polynomials, and as aprioristic information the moments-cumulant description of random variables is used. The model of random variables is the additive mixture of the useful harmonious signal and non-Gaussian interference.

In this article algorithms of joint estimation of Doppler frequency shift and the variance and asymmetry parameter of asymmetric non-Gaussian interference up to fourth degree of sedate stochastic polynomials inclusive are synthesized. Analytical expressions of the found dispersion estimations are received and investigated. It is shown that dispersion decreases and at the movement of asymmetry coefficient to the boundary of acceptable variance estimation dispersions go to zero. Also with increasing the degree of polynomial stochastic estimation variance decreases.

It is found that algorithms of joint evaluation of Doppler frequency of asymmetric interference using the method of polynomial maximization are more accurate in comparison with classical estimation of algorithms relevant parameters. Based on the results, obtained in this paper, it is possible to build more accurate devices for determining Doppler frequency with unknown statistical characteristics of the interference.

Keywords: *Doppler frequency, non-Gaussian interference, asymmetric interference, parameter estimation, polynomial maximization method, dispersion, asymmetry parameter.*

*Рецензенти: Ю. Г. Лега, д.т.н., професор,
А. А. Засядько, д.т.н., професор*

А. Д. Кожухівський, д.т.н, професор,

О. В. Горбенко, аспірант

e-mail: horbenko@2upost.com

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18000, Україна

РОЗРОБКА ЕМУЛЯТОРА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ І УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

Розглядається питання моделювання системи навігації і управління мобільним роботом. Пропонується один із шляхів вирішення цієї проблеми та наведено схему визначення меж робочого простору, який формується під час руху робота. Представлено метод та засоби щодо рішення навігаційних задач та стратегії функціонування роботів, які повинні будувати маршрути, управляти параметрами руху, правильно інтерпретувати одержувану від датчиків інформацію про оточення та відстежувати власні координати. Розглядається метод створення мобільного робота, що володіє здатністю до самостійного пересування і автоматичного виконання поставлених завдань. Моделювання та обчислювальні експерименти дозволять підвищити ефективність досліджень динамічних властивостей колісних роботів і проаналізувати різні варіанти стратегій і схем управління.

Ключові слова: емулятор, мобільний робот, моделювання, автоматизація.

Вступ. Нині сфери застосування мобільної робототехніки істотно розширюються в багатьох галузях діяльності людини. Особливо це характерно для діяльності, здійснюваної при вирішенні спеціальних завдань, пов'язаних із загрозами для здоров'я і життя людей.

Застосування мобільних роботів дає змогу виключити загрозу здоров'ю і життю людини-оператора. Таким чином, актуальною є проблема створення мобільних роботів, що володіють здатністю до самостійного пересування і автоматичного виконання поставлених завдань.

Роботи – автоматичні системи, призначені для відтворення рухових та інтелектуальних функцій людини. Від традиційних автоматів відрізняються більшою універсальністю і здатністю адаптації на виконання різних завдань, у тому числі в змінюваній обстановці.

Постановка проблеми. Нині існує величезна кількість методів і алгоритмів визначення перешкод, однак основним недоліком більшості методів є те, що майже всі методи вимагають певної апаратури, наприклад, різних датчиків [1].

Тому виникає необхідність у створенні віртуального середовища для моделювання та розробки мобільного робота.

Різні методи вимагають різного набору датчиків. Сучасною тенденцією є дослідження застосування таких технологій, які дозволили б реалізовувати процеси так, як їх виконує людина. Це, в першу чергу, стосується і методик обходу перешкод.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз публікацій за останній час показує, що зусилля багатьох дослідницьких лабораторій у галузі робототехніки спрямовані на побудову автономних роботів і вирішення пов'язаних з цим специфічних завдань.

Одним із ключових завдань при функціонуванні роботів у невідомій обстановці є планування безпечних траєкторій, що дозволяють будувати безпечні маршрути переміщення [2].

Складність побудови маршруту мобільного робота полягає в тому, що, по-перше, в робочій зоні наявні інші рухливі перешкоди, рух яких у більшості випадків розглядається як випадковий процес з невідомими параметрами, а по-друге, обчислювальні можливості бортових систем мобільних роботів обмежені, що не дозволяє вирішувати задачу планування з використанням класичних переборних або потенційних алгоритмів [3].

Тому у великій частині публікацій розглядаються різні способи використання інтелектуальних алгоритмів, побудованих з вико-

ристанням нейронних мереж, нечітких або генетичних алгоритмів [4].

Метою роботи є розробка емулятора формування віртуального простору для моделювання робота з навігацією в невідомому середовищі.

Постановка задачі. Необхідно створити емулятор автоматично і дистанційно керованого мобільного робота, здатного рухатися по пересіченій місцевості, з маніпулятором для захоплення об'єктів і датчиками для проведення досліджень.

Вирішення задачі. Рухливі роботи відомі і використовуються досить давно в різних галузях людської діяльності. Вони повинні бути пристосовані до самостійного переміщення в робочому просторі, призначені для автоматичного транспортування різних предметів, екологічного моніторингу, попередження надзвичайних ситуацій, розвідки, збору інформації про об'єкти.

Автономний мобільний робот є складною керованою електромеханічною системою, що складається з ходової частини та багаторівневої системи управління рухом. У ньому одночасно відбуваються механічні процеси – рух робота та інформаційні процеси: обробка сигналів вимірювальних пристроїв і формування керуючих сигналів.

Ходова частина робота може бути колісною, гусеничною або швидкозамінною з колісною на гусеничну, і навпаки.

Вибір типу ходової частини визначається характером місцевості, на якій переважно використовуватиметься робот. Класифікація місцевості може бути проведена за значенням вимірюваної кореляційної функції в різних точках. Перший параметр кореляційної функції, який може бути покладений в основу цієї класифікації – значення функції $K_{\uparrow m}$ в точці $m = 0$ [5].

У цій точці $K_{\uparrow m}$ дає дисперсію мікронерівностей дороги.

Проте дисперсія має розмірність квадрата відстані, тому дороги прийнято розрізняти за середньоквадратичним відхиленням, тобто за значенням $\sqrt{K_{\uparrow 0}}$.

Дороги розрізняються таким чином:

- дороги першого класу, в яких $\sqrt{K_{\uparrow 0}} \leq 0,1$ м;

- дороги другого класу, в яких $0,1 \leq \sqrt{K_{\uparrow 0}} \leq 0,2$ м;

- дороги третього класу, в яких $\sqrt{K_{\uparrow 0}} > 0,2$ м.

Дороги третього класу $\sqrt{K_{\uparrow 0}} > 0,2$ м зустрічаються рідко, в міських умовах більшість доріг можна віднести до першого класу, а в польових умовах – до другого [6].

Мобільний робот, який призначений для роботи на важкодоступній місцевості, має гусеничну ходову частину. При переважному використанні робота на рівній поверхні використовується колісний варіант транспортного засобу.

Основні властивості колісних транспортних засобів мобільного робота (прохідність, економічність, плавність ходу і стійкість руху), в першу чергу, залежать від загальної кількості коліс і кількості приводних коліс.

Найбільш поширеною конструктивною схемою мобільних колісних роботів є чотириколісна. Такі транспортні системи мають високі експлуатаційні якості на рівних твердих поверхнях. Збільшення прохідності робота досягається завдяки системам з індивідуальним приводом на кожне колесо [7].

Поряд з перевагами такі колісні транспортні системи мають суттєві недоліки: подолання незначних по висоті перешкод, відсутність можливості пересування сходами і обмеженість руху по ухилах. Ці недоліки істотно звужують діапазон застосування чотириколісних мобільних роботів.

Збільшення кількості коліс призводить до ускладнення конструкції, в той же час збільшується профільна прохідність, поліпшується маневреність при використанні бортової схеми повороту. Для підвищення адаптації багатоколісних машин до поверхні складного профілю їх корпус виконують у вигляді секцій, з'єднаних спеціальним шарніром. При цьому всі колеса є тяговими.

Гусенична ходова частина конструктивно складніша, важка і менш надійна порівняно з колісною, але має цілий ряд істотних переваг, наприклад, краща опорно-тягова і профільна прохідність, більша міцність.

Гусеничний робот володіє більш високою прохідністю за рахунок надійного зчеплення з поверхнею руху, може долати перешкоди у вигляді виступів і провалів, а також пересуватися сходами [8].

Мобільний робот може використовувати датчики температури, інфрачервоні сенсори, глобальну систему позиціонування (GPS)

для сприйняття навколишнього середовища, а також пристрої, що відповідають за переміщення робота [9].

Для успішної навігації в просторі система робота повинна вміти будувати маршрут, управляти параметрами руху (задавати кут повороту коліс і швидкість їх обертання), правильно інтерпретувати інформацію про середовище функціонування, що отримується від датчиків. Мобільний робот повинен постійно відстежувати власні координати.

Для цього потрібно вирішити такі завдання:

- забезпечення автоматичного руху;
- забезпечення стійкості функціонування в усіх режимах;
- визначення положення мобільного робота в просторі;
- формування віртуального простору робочої зони;
- визначення стратегії функціонування.

Вирішення перелічених задач у реальних умовах є складним завданням і може потребувати досить великих матеріальних ресурсів і часу. Тому доцільним є створення віртуального середовища, в якому можна моделювати різні аспекти функціонування робота, що охоплюють завдання формування локації, формування уявлення про простір, планування і відпрацювання утилітарних завдань.

Емулятор повинен сприймати змодельовані сигнали зовнішнього світу за реальні. Тобто, в моделі не повинно бути апаратної частини. При цьому програма має сприймати все як реальність.

Програмний емулятор повинен включати в себе візуалізатор процесу функціонування робота. З огляду на те, що весь цей процес проходить у горизонтальній площині, бажано візуалізувати його за допомогою «виду зверху», тому що при цьому добре видно шлях, яким рухається робот.

Для створення емулятора потрібно провести проектування вбудованого програмно-апаратного забезпечення і проектування устаткування, сенсорний відбір, проектування систем управління і механічних конструкцій. Проведення такого обсягу робіт вимагає значних витрат і призводить до появи невідповідності або помилок навіть концептуального характеру. В цьому випадку середовище моделювання надає віртуальні простори для тестування, вимірювання та візуалізації алгоритмів

роботів і, найголовніше, дозволяє виявити ризики погіршення функціонування робота.

Моделювання відіграє ключову роль у галузі роботобудування, тому що воно дозволяє проводити експерименти, які в реальних умовах були б дорогими або вимагали великих витрат часу.

Облік фізичних процесів руху робота досягається через введення відповідних моделей, які наближено дозволяють урахувати зазначені обставини функціонування робота в реальних умовах.

Моделювання дозволяє проводити випробування в динамічних штучних середовищах, збираючи дані, щоб визначити якість системи управління.

Для моделювання робота у віртуальному середовищі та емуляції його поведінки використовуються просторові типи даних, за допомогою яких створюються віртуальні перешкоди.

Основне призначення просторових типів даних – представляти такі властивості реальних об'єктів, як розташування, форма, розміри, тобто геометрію об'єктів. На практиці створення об'єктів зі складною геометрією проводиться шляхом послідовної побудови простіших елементів, які прийнято називати геометричними примітивами. Вони можуть бути простими і складними.

До простих примітивів відносять: точку, відрізок, коло, дугу, пряму, промінь, еліпс, сплайн. До складних примітивів зазвичай відносять: полілінію, мультилінію, мультитекст, розмір, винос, допуск, штрихування, вхідження блоку або зовнішнього посилання, атрибут, растрове зображення.

Вирішення зазначених вище завдань дозволяє отримати інструментальний засіб для дослідження алгоритмів функціонування мобільних роботів при виконанні різних утилітарних завдань.

Моделювання функціонування мобільного робота проходить у дві стадії. На першій проводиться сканування простору та визначаються координати характерних точок контурів, тобто таких точок, які визначають геометрію. На другій стадії визначається стратегія функціонування відповідно до призначення мобільного робота.

Визначення меж контурів проходить шляхом взаємодії просторових сенсорів робота з елементами простору. Характер взаємодії, перш за все, визначається діаграмою направ-

леності сенсорів. Для мобільних роботів просторові датчики являють собою кільце, яке зміщується при наїзді робота на перешкоду, при цьому формується пропорційний сигнал сили контакту. В останньому варіанті можливо при емуляції вибирати колову діаграму на правленості, а на схемі її представляти у вигляді кола, вісь якого збігається із віссю обертання робота. Характер взаємодії при цьому можливо вважати як точковий і знаходити як перетин кола та прямої [10]:

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2; \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}. \end{cases} \quad (1)$$

Для вирішення системи (1) необхідно розв'язати рівняння прямої відносно y та зробити його підстановку у рівняння кола. Ввівши заміну $A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ та провівши спрощення, отримуємо наступне рівняння:

$$\begin{aligned} & A^2 \times x^2 + x^2 - 2 \times A^2 \times x \times x_1 - \\ & 2 \times A \times x \times y_0 + 2 \times A \times x \times y_1 - 2 \times x \times \\ & x_0 + x_0^2 + y_0^2 - 2 \times y_0 \times y_1 + A^2 \times x_1^2 + 2 \times \\ & A \times x_1 \times y_0 - 2 \times A \times x_1 \times y_1 - R^2 + y_1^2 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) зводиться до рішення звичайного квадратного рівняння $ax^2 + by + c = 0$, де: $a = 1 + A^2$; $b = -2 \times (A^2 \times x_1 + A \times y_0 - A \times y_1 + x_0)$.

На рис. 1 зображено схему визначення робочого простору робота.

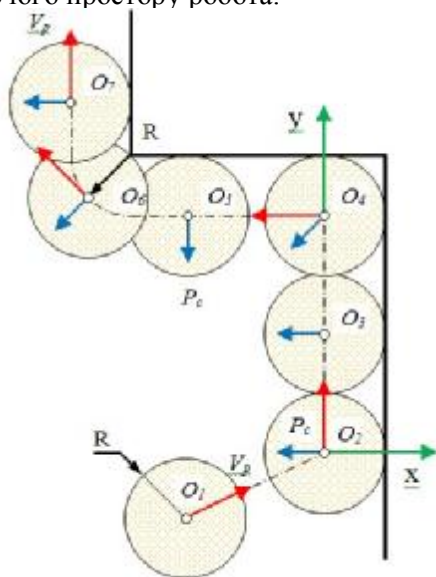


Рис. 1. Схема визначення меж робочого простору

Розглянемо принцип роботи наведеної схеми. Оскільки в початковий момент робот не має уявлення про оточення, то відповідно до зазначеної концепції доцільно здійснювати рух робота прямо. Перше зіткнення з об'єктом дає точку O_2 . Вектор взаємодії сенсора з об'єктом P_c утворює з вектором швидкості руху V_p кут $\varphi = \pi/2$. Тому напрямок руху робота коректується на визначену величину та здійснюється прив'язка системи координат до нового положення робота. В подальшому проводиться об'їзд контуру. При цьому має місце швидка зміна напрямку руху $\vec{P}_c$. Точка зміни напрямку руху сприймається як характерна точка об'єкта, координати якої зберігаються в структурі опису контуру.

Відповідно до вибраної моделі віртуального простору його формування слід проводити шляхом обходу усіх контурів середовища та об'єктів, причому лише периметр середовища буде зовнішнім контуром. Після завершення виявлення усіх контурів доцільно систему координат перенести, щоб усі точки контуру середовища знаходились у першому квадранті.

Операцією перенесення системи координат у саму ліву нижню точку віртуального простору завершується формування моделі простору робочої зони мобільного робота.

Робоча зона мобільного робота визначена контуром приміщення, який у віртуальній моделі буде представлений вектором $K_0 = \{a_i\}$; $i \in N$, де a_i – характерні точки контуру.

Таке уявлення не дозволяє описати всі види геометрії приміщення, але дозволяє спростити математичні і логічні маніпуляції в рішенні задач навігації та стратегії функціонування. У разі, якщо контур приміщення сформований з ліній вищих порядків, то його можна апроксимувати ламаною. Контур приміщення являє внутрішню область функціонування мобільного робота, однак вона обмежена геометрією предметів, розташованих у площині переміщення робота. Це обмеження виражається як $K = \{K_j\}$; $j \in N$, де $K_j = \{b_{j,n}\}$; $n \in N$ – контури опису предметів, що становлять лінійний вектор, зображений у вигляді послідовності характерних точок контуру.

І зовнішні, і внутрішні контури описуються точками у вигляді $a(x, y)$ та $b(x, y)$, x, y –

координати точок, причому $a, b \in R^2$, де R – радіус кола робота.

З урахуванням вищесказаного, доцільно модель віртуального простору представити у вигляді:

$$F = \{p \in P \mid p \in K_0, p \notin K\}.$$

У програмі управління роботом віртуальний простір представляється у вигляді структури, в якій зазначено кількість контурів, і масиву елементів типу «контур». У цій структурі розглядається кількість характерних точок, які поміщаються в цей масив.

Висновок. Розглянуто метод створення мобільного робота, що володіє здатністю до самостійного пересування і автоматичного виконання поставлених завдань. Представлено процес створення системи навігації, що дозволяє складати карту середовища, в якому функціонує мобільний робот. Наведено метод планування маршруту і обходу перешкод в емуляторі, який дозволяє проводити експерименти, що в реальних умовах були б дорогими або вимагали великих витрат часу.

Моделювання та обчислювальні експерименти дозволять підвищити ефективність досліджень динамічних властивостей колісних роботів і проаналізувати різні варіанти стратегій і схем управління.

Список літератури

1. Даринцев О. В. Система планирования движения группы мобильных микророботов на основе генетических алгоритмов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 3. – С. 163–173.
2. Терехов С. А. Лекции по нейронным сетям / С. А. Терехов // Лаборатория искусственных нейронных сетей НТО – 2. – ВНИИТФ, Снежинск, 1998. – С. 154.
3. Юревич Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич – СПб. : БХВ – Петербург, 2010. – 368 с.
4. Chand P. Towards a robust feedback system for coordinating a hierarchical multi-robot system / P. Chand, D. A. Carnegie // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – 62. – pp. 91–107.
5. Foderaro G. Distributed optimal control for multi-agent trajectory optimization / G. Foderaro, S. Ferrari, T. A. Wettergren // Automatica. – 2014. – 50. – P. 149–154.

6. Kohonen T. Self-organizing maps / T. Kohonen. – New York : Springer-Verlag, 2001. – P. 501.
7. Lagoudakis Michail G. Mobile robot local navigation with a polar neural map: a thesis for Master of Science degree. – Spring, 1998. – P. 135.
8. Информационные устройства робототехнических систем : учеб. пособие / [под ред. С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.
9. Гусев Д. М. Навигация мобильного робота на полигоне, оснащённом системой маяков / Д. М. Гусев, А. И. Кобрин, Ю. Г. Мартыненко // Мобильные роботы и мехатронные системы : Материалы Науч. школы-конф., 5-6 декабря 2000 г. – М. : Изд. Моск. ун-та. – 2000. – С. 140–151.
10. Бурдаков С. Ф. Системы управления движением колесных роботов / С. Ф. Бурдаков, И. В. Мирошник, Р. Э. Стельмаков. – СПб. : Наука, 2001. – 352 с.
11. Suruz Miah M. Mobile robot trajectory tracking using noisy RSS measurements : an RFID approach / Miah M. Suruz, W. Gueaieb // ISA Transactions. – 2014. – 53. – P. 433–443.

References

1. Darintsev, O. V. and Migranov, A. B. (2007), System for traffic planning of mobile micro-robots group based on genetic algorithms. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, (3), pp. 163–173 [in Russian].
2. Terekhov, S. (1998), Lectures on neural networks. *Laboratoriya iskusstvennykh neyronnykh setey NTO*, (2), VNIITF, Snezhinsk, p. 154 [in Russian].
3. Yurevich, E. I. (2010), Fundamentals of robotics. St. Petersburg: BHV – Petersburg, 368 p. [in Russian].
4. Chand, P. and Carnegie, D. A. (2014), Towards a robust feedback system for coordinating a hierarchical multi-robot system. *Robotics and Autonomous Systems*, (62), pp. 91–107.
5. Foderaro, G., Ferrari, S. and Wettergren, T. A. (2014), Distributed optimal control for multi-agent trajectory optimization. *Automatica*, (50), pp. 149–154.
6. Kohonen, T. (2001), Self-organizing maps. New York: Springer-Verlag, p. 501.

7. Lagoudakis, Michail, G. (1998), Mobile robot local navigation with a polar neural map: a thesis for Master of Science degree, Spring, p. 135.
8. Information devices of robotic systems (2005), In: S. L. Zenkevich, A. S. Yushenkov (eds.). Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 384 p. [in Russian].
9. Gusev, D. M., Kobrin, A. I. and Martynenko, Y. G. (2000) Navigation of mobile robot on training ground, equipped with a system of beacons. *Mobilnyye roboty i mehatronnyye sistemy*: materials of sci. school-conf., 5–6 Dec. Moscow: Izd. Mosk. Un-ta, pp. 140–151 [in Russian].
10. Burdakov, S. F., Miroshnik, I. V. and Stelmakov, R. E. (2001), Control systems of wheeled robots motion. St. Petersburg: Nauka, 352 p. [in Russian].
11. Suruz, Miah, M., Gueaieb, W. (2014), Mobile robot trajectory tracking using noisy RSS measurements: an RFID approach. *ISA Transactions*, (53), pp. 433–443.

A. D. Kozhukhivskiy, Dr.Tech.Sc., professor,

O. V. Horbenko, Ph.D.

e-mail: horbenko@2upost.com

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18000, Ukraine

DEVELOPMENT OF EMULATOR FOR NAVIGATION SYSTEM MODELING AND MOBILE ROBOT CONTROL

The problem of navigation system modeling and mobile robot control is considered. One of the ways to solve this problem is offered and the diagram determining the boundaries of a working space, which is formed during robot's movement, is shown. The methodology and tools to solve navigational problems and strategies of robots' functioning, that have to build a route, to control motion parameters, to interpret the resulting information from sensors monitor on the environment and their coordinates, are described. The method of development of a mobile robot, that has the ability to independently move and to automatically perform tasks, is considered. An important role is played by creating a navigation system that allows to draw a map of the environment in which a mobile robot operates to plan a route that leads to the goal and avoid obstacles.

The use of mobile robots eliminates the threat to health and life of the operator. So the problem of creating mobile robots that have the ability to independent movement and automatically perform tasks is important.

Currently, the application of mobile robotics is significantly expanded in many areas of human activity. This is especially true for activities performed to solve specific problems, related with threats to health and life.

Robots is automatic systems are designed for playback of motor and intellectual functions of man. Comparing with traditional machines they are more versatile and able to be adapted to various tasks, including changing environment.

Keywords: emulator, mobile robot, modeling, automation.

Статтю представляє А. Д. Кожухівський, д.т.н., професор, Черкаський державний технологічний університет.

УДК 664.1.03

Н. А. Гусятинська, д.т.н., професор,
e-mail: NGusiatinska@ukr.net

Н. М. Романченко, к.т.н., доцент,
e-mail: NataRomano@ukr.net

С. М. Тетеріна, к.т.н., доцент
e-mail: teterina_s@ukr.net

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ОЧИЩЕННЯ КЛЕРОВКИ ТРОСТИННОГО ЦУКРУ-СИРЦЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АКТИВНОГО ХЛОРУ

Досліджено дезінфікуючу дію водного розчину натрієвої солі дихлорізоціанурової кислоти щодо основних контамінантів у виробництві білого цукру з тростинного цукру-сирцю. Встановлено ефективність застосування засобу «Жавель-Клейд» для пригнічення розвитку слизоутворювальних бактерій. Розроблено спосіб дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю, реалізація якого дозволяє провести ефективне знезараження клеровки за невеликих витрат дезінфікуючого засобу, 0,0001...0,0003 % до маси тростинного цукру-сирцю.

Ключові слова: тростинний цукор-сирець, клеровка, слизоутворювальні мікроорганізми, дезінфекція.

Вступ. Серед актуальних проблем підвищення якості готової продукції слід визначити питання, пов'язані з дослідженням мікрофлори тростинного цукру-сирцю, розробленням сучасних заходів дезінфекції у виробництві білого цукру.

Вагомий внесок у розроблення технології зберігання та перероблення тростинного цукру-сирцю зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: Бугаєнко І. Ф., Штангеев В. О., Рева Л. П., Мішук Р. Ц., Ліпєц А. А., Сапронов О. Р., Міхатова Г. Н., Голибін В. А., Єгорова М. І., Хвалковський Т. П. та ін. [1, 2].

До видової мікрофлори тростинного цукру-сирцю входить достатньо широкий спектр бактерій (мезофіли, термофіли, слизоутворювальні мезофіли) та мікроміцетів (плісняві гриби, осмофільні дріжджі). Бактеріальна мікрофлора включає в основному представників родів *Bacillus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus* та *Lactobacillus*, а серед дріжджів – *Torulopsis*, *Saccharomyces*. Серед видового складу міцеліальних грибів тростинного цукру-сирцю слід виділити представників родів *Verticillium*, *Rhizopus*, *Botrytis*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor* [3, 4]. Вплив перебігу мікробіологічних процесів полягає у розкладанні сахарози та накопиченні ряду продуктів метаболізму, що спричинює погіршення якості продуктів та перебігу технологічних процесів.

Слід зазначити, що вміст мікроорганізмів у тростинному цукрі-сирці, що надходить у клерувальне відділення цукрового заводу, залежить як від якості, так і умов його попереднього зберігання. В той же час протягом технологічного процесу виробництва цукру з тростинного цукру-сирцю необхідно приділяти увагу мікробіологічній забрудненості напівпродуктів виробництва, оскільки мікроорганізми до них можуть потрапляти з водою, що йде на клерування, з апаратів, у яких здійснюються технологічні процеси, з повітрям тощо.

Мета досліджень. Метою представлених досліджень є визначення оптимальних концентрацій засобу «Жавель-Клейд» для пригнічення розвитку основних груп мікроорганізмів – контамінантів тростинного цукру-сирцю та забезпечення ефекту знезараження одержаної клеровки.

Нами проведені дослідження мікробіологічних показників продуктів виробництва за умови використання для дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю засобу формалін у кількості 0,005 % до маси цукру-сирцю.

Одержані результати свідчать про значний рівень мікробіологічного забруднення продуктів виробництва. Так, вміст МАФАМ (мезофільні аеробні й факультативно анаеробні мікроорганізми) у промивній воді – більший $1 \cdot 10^5$ КУО (колонієутворювальних одиниць) в

10 г, у т.ч. слизоутворювальних бактерій – $4,6 \cdot 10^3$ КУО, дріжджів – $3,8 \cdot 10^2$ КУО, міцеліальних грибів – $4 \cdot 10^3$ КУО. Промивна вода є сприятливим середовищем для життєдіяльності та розмноження мікроорганізмів, оскільки містить сахарозу та інші органічні й мінеральні речовини, необхідні для живлення мікроорганізмів. Крім того, промивна вода надходить у декілька збірників, де можливе її додаткове забруднення мікроорганізмами з навколишнього середовища.

Аналіз мікрофлори білого цукру, одержаного при переробленні тростинного цукру, свідчить про перевищення вмісту міцеліальних грибів і дріжджів відповідно до вимог ДСТУ, що знижує якість цукру та може спричинити погіршення якості та здатності до зберігання ряду харчових продуктів при подальшому використанні. Таким чином, важливим завданням при переробленні тростинного цукру-сирцю є забезпечення умов технологічного режиму, за якого досягається ефективна дезінфекція продуктів та якість білого цукру.

Серед хімічних засобів, що отримали достатньо широке застосування у бурякоцукровому виробництві, слід виділити засоби на основі натрієвої солі дихлорізоціанурової кислоти, зокрема дезінфекційний засіб «Жавель-Клейд» [5–10]. Антимікробна дія натрієвої солі дихлорізоціанурової кислоти зумовлена високою окиснювальною здатністю хлору, що призводить до порушення метаболічних процесів клітини і викликає загибель мікроорганізмів.

Для встановлення оптимальних витрат та розроблення способу введення дезінфікуючого засобу нами досліджено ефективність застосування зазначеного антисептика під час перероблення тростинного цукру-сирцю.

Як об'єкт дослідження обрана промивна вода після знецукрення фільтраційного осаду. Методика досліджень полягала в наступному. До промивної води додавали дезінфікуючий засіб «Жавель-Клейд» у кількості 0,00005...0,0004 % до маси продукту, після чого вихідну та оброблену проби аналізували з метою визначення загального вмісту мікроорганізмів, у тому числі вмісту мезофільних та слизоутворювальних бактерій, міцеліальних грибів та дріжджів. Дослідження проводили за методом розведень та висіву проб на тверді поживні середовища у чашці Петрі.

Результати експериментальних досліджень щодо визначення ефективності дії дезінфекційного засобу «Жавель-Клейд»

(табл. 1) свідчать про високу бактерицидну дію щодо всіх груп мікроорганізмів, наявних у промивній воді. Необхідно відзначити високу знезаражувальну дію засобу щодо слизоутворювальних бактерій. Так, за витрат засобу «Жавель-Клейд» у кількості 0,0002...0,0004 % до маси цукру-сирцю ефект знезараження щодо слизоутворювальних мікроорганізмів становить 75,3...90,2 %.

Таблиця 1

Мікробіологічні показники промивної води при додаванні дезінфікуючого засобу «Жавель-Клейд»

Витрати анти-септика, % до маси цукру-сирцю	Показники			
	Загальний вміст мікроорганізмів, КУО / мл	Вміст слизоутворювальних бактерій, КУО / мл	Вміст мікроміцетів, КУО / мл	Загальний ефект знезараження, %
0	$2,1 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$	–
0,00005	$1,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	31,79
0,00008	$8,6 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^3$	54,7
0,0001	$5,4 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$	68,9
0,0002	$3,2 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^2$	$8,5 \cdot 10^2$	82,1
0,0003	$2,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	94,8
0,0004	$1,6 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	97,9

Також проведені дослідження мікробіологічних показників клеровки, одержаної у разі використання під час клерування тростинного цукру-сирцю промивної води, після обробки дезінфектантом (табл. 2). Процес клерування проводили 15 хв. за температури 70 °С і витрат промивної води 80 % до маси тростинного цукру-сирцю.

Результати досліджень, наведені в табл. 2, свідчать про зменшення мікробіологічної забрудненості клеровки тростинного цукру-сирцю за всіма групами мікроорганізмів у разі застосування для обробки промивної води дезінфікуючого засобу «Жавель-Клейд». Так, за витрат дезінфектанту від 0,0001 до 0,0003 % до маси цукру-сирцю загальна кількість мікроорганізмів зменшилась у 8...10 разів. Подальше збільшення дозування засобу понад 0,0004 % до маси клеровки є недоцільним. Для оптимальної ефективності запропонованого способу рекомендується застосовувати водний розчин натрієвої солі дихлорізоціанурової кислоти у кількості 0,0001...0,0003 % до маси тростинного цукру-сирцю.

Таблиця 2
**Мікробіологічні показники клеровки
 тростинного цукру-сирцю
 при різних витратах дезінфікуючого засобу
 «Жавель-Клейд»**

Витрати анти- септика, % до маси цукру- сирцю	Показники			
	Загальний вміст мік- рооргані- змів, КУО / мл	Вміст слизо- утворю- вальних бактерій, КУО / мл	Вміст мікро- міцетів, КУО / мл	Загаль- ний ефект знезара- ження, %
0	$1,3 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^3$	—
0,00005	$8,8 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	30,2
0,00008	$6,8 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	46,7
0,0001	$4,1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	67,5
0,00015	$3,2 \cdot 10^3$	$9,2 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^3$	75,1
0,0002	$2,3 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^2$	$8,6 \cdot 10^2$	81,7
0,0003	$1,2 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^2$	$5,4 \cdot 10^2$	90,5
0,0004	$1,0 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$	91,8

Отже, на основі проведених досліджень можна зробити висновок, що дезінфекційні засоби на основі активного хлору мають високу ефективність відносно більшості мікроорганізмів, наявних у сировині та продуктах виробництва цукру з тростинного цукру-сирцю. На основі одержаних результатів розроблено спосіб дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю [11], згідно з яким дезінфікуючий засіб додається у промивну воду у вигляді 0,5...2 % розчину. Оброблена дезінфектантом промивна вода використовується для клерування цукру-сирцю, що сприяє ефективному знезараженню клеровки та рівномірному розподілу засобу по всьому об'єму клерувального апарата. Витрати засобу становлять 0,0001...0,0003 % до маси тростинного цукру-сирцю.

Запропонована технологічна схема відрізняється від типової тим, що у клерувальну мішалку повертається відокремлений вапно-карбонізаційний осад у вигляді суспензії, який після адсорбції барвних речовин видаляється з виробництва шляхом фільтрування. Остаточне видалення осаду потребує його промивання для досягнення нормативного вмісту сахарози. Одержані промивні води, що містять сахарозу, повертаються у клерувальну мішалку для розчинення тростинного цукру-сирцю. Промивна вода обробляється дезінфікуючим засобом на основі активного хлору. Крім того, додатково встановлюється збірник-мішалка для обробки

клеровки розчином коагулянту. Для здійснення інших технологічних процесів очищення використовується типове обладнання згідно з технологічною схемою переробки тростинного цукру-сирцю.

Принципова технологічна схема зображена на рис. 1.

Згідно з наведеною технологічною схемою тростинний цукор-сирець стрічковим транспортером (2), над яким знаходиться магнітний сепаратор (1), подається в збірник-мішалку (3), де розчиняється водою після промивання осаду до вмісту сухих речовин 52...55 %. Промивна вода обробляється дезінфікуючим засобом на основі активного хлору, який додається до неї у вигляді 0,5...2 % розчину у збірник-мішалці (4). У клерувальну мішалку надходить також суспензія вапно-карбонізаційного осаду в кількості 4...16 % до маси клеровки із збірника (17). За допомогою насоса (7) одержана клеровка надходить у підігрівник (5), де підігрівається до температури 85 °С, після підігрівання клеровка фільтрується на фільтрах типу фільтрпрес (6), осад промивається для додаткового знецукрення, після чого виводиться з виробництва, а промивна вода повертається на станцію клерування тростинного цукру-сирцю.

Далі клеровка надходить у збірник (9), де обробляється коагулянтом основним сульфатом алюмінію у кількості 0,01...0,02 % до маси клеровки. Коагулянт (основний сульфат алюмінію) у сухому вигляді подається в збірник-мішалку (8) та розчиняється барометричною водою. Оброблена основним сульфатом алюмінію клеровка насосом (7) подається в апарат для вапнування (11), де обробляється гідроксидом кальцію, який надходить з дозатора вапняного молока (12) у кількості 2...3 % СаО до маси клеровки. Після основного вапнування клеровка тростинного цукру-сирцю обробляється карбонізаційним газом у карбонізаторах (13, 14). Після першого котла карбонізації (13) клеровка через переливний ящик (15) потрапляє в другий котел карбонізації (14), після якого клеровка надходить у збірник (16), звідки насосом (7) подається на фільтрпреси (6) для фільтрування.

Після фільтрування одержують очищену клеровку та осад. Очищена клеровка зі збірника (18) надходить у продуктове відділення, а згущена суспензія з осадом потрапляє в збірник (17) та насосом (7) подається на клерування тростинного цукру-сирцю.

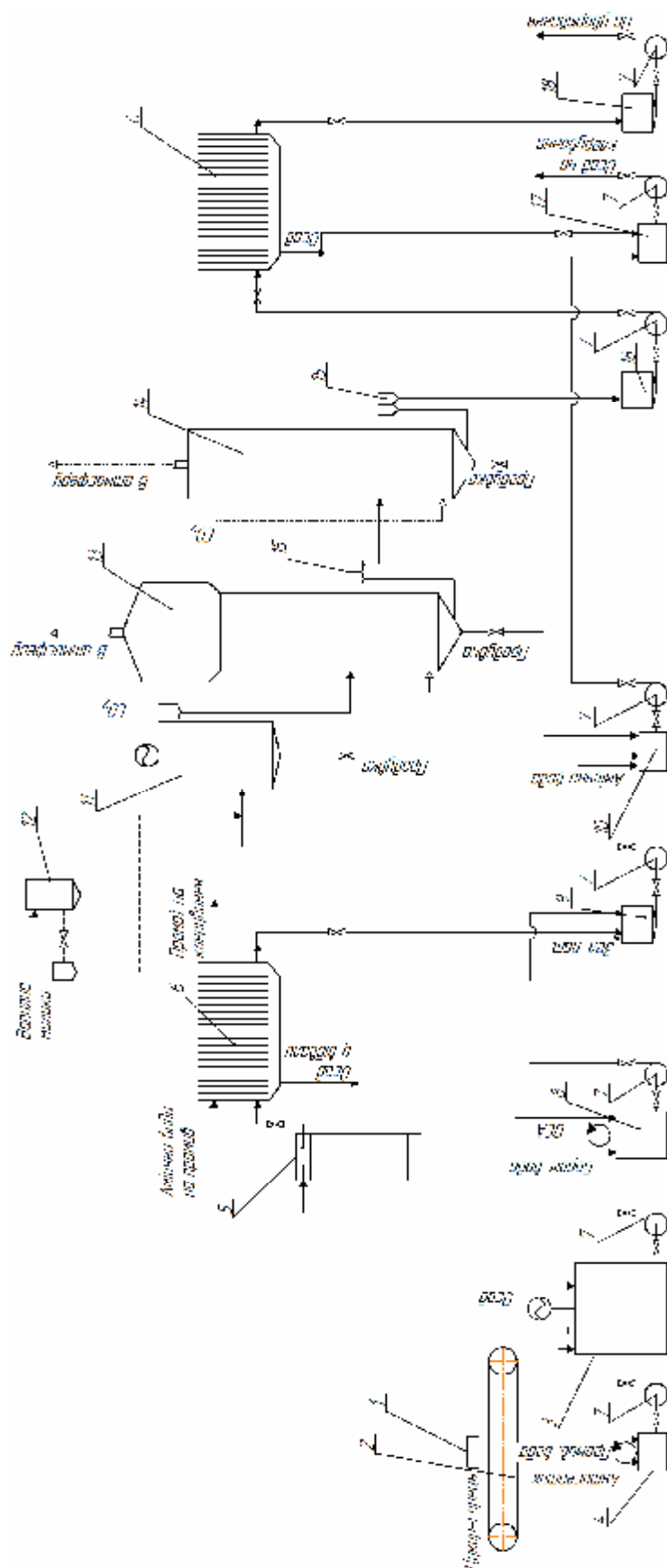


Рис. 1. Апаратурно-технологічна схема очищення клеровки тростинного цукру-сирцю:

1 – магнітний сепаратор; 2 – стрічковий транспортер; 3, 4 – збірник-мішалка для розчин. цукру-сирцю; 4 – збірник-мішалка антисептика; 5 – підігрівник; 6 – фільтр-прес; 7 – насос; 8 – збірник-мішалка ОСА; 9 – збірник клеровки і зеленої патоки; 10 – збірник пролувки; 11 – дефекатор; 12 – дозатор вапняного молока; 13 – I котел карбонізації; 14 – II котел карбонізації; 15 – переливний ящик; 16 – збірник клеровки після карбонізації; 17 – збірник осаду; 18 – збірник очищ. клеровки на уварювання

Проведені порівняльні промислові випробування з використанням дезінфекційного засобу «Жавель-Клейд» і формаліну для дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю на Уваровському та Володимир-Волинському цукрових заводах показали, що при використанні засобу «Жавель-Клейд» загальна кількість мікроорганізмів у продуктах зменшилась у середньому в 2...3 рази порівняно з застосуванням формаліну. Загальний ефект знезараження клеровки цукру-сирцю збільшився на 1,21 % порівняно з формаліном і становив 96,19 %.

Висновки. Дезінфекційні засоби на основі активного хлору мають високу ефективність порівняно з більшістю мікроорганізмів, наявних у сировині та продуктах виробництва цукру з тростинного цукру-сирцю. На основі одержаних результатів розроблено спосіб дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю [11], згідно з яким дезінфікуючий засіб додається у промивну воду у вигляді 0,5...2 % розчину. Таким чином, застосування для дезінфекції засобів на основі натрієвої солі дихлорізоціанурової кислоти в процесі клерування тростинного цукру-сирцю (у кількості 0,0001...0,0003 % до маси тростинного цукру-сирцю) дає змогу зменшити вміст мікроорганізмів у клеровці, що сприятиме покращенню технологічних показників готової продукції, в тому числі, досягненню відповідності показникам ДСТУ 4623:2006 щодо допустимого вмісту різних груп мікроорганізмів у білому цукрі.

Список літератури

1. Бугаенко И. Ф. Повышение эффективности переработки тростникового сахара-сырца / И. Ф. Бугаенко. – М. : Теллер, 2000. – 296 с.
2. Сапронов А. Р. Красящие вещества и их влияние на качество сахара / А. Р. Сапронов, Р. А. Колчева. – М. : Пищевая промышленность, 1975. – 306 с.
3. Находкина В. З. Микробиология и микробиологический контроль в свеклосахарном производстве / В. З. Находкина. – М. : Пищевая промышленность, 1975. – 94 с.
4. Гусятинська Н. А. Особливості мікробіологічного контролю у виробництві цукру з тростинного цукру-сирцю / Н. А. Гусятинська // Цукор України. – № 3. – К. : НАЦУ, 2010. – С. 32–36.
5. Гусятинська Н. А. Аналіз мікробіологічних процесів під час перероблення тростинного цукру-сирцю / Н. А. Гусятинська, С. М. Тереріна, Н. М. Романченко // Харчова промисловість. – 2011. – № 10. – С. 8–12.
6. Горчинский Ю. Н. Технология получения особо чистого стерилизованного сахара из сахара-песка / Ю. Н. Горчинский, О. А. Потапов, Ф. П. Никоненко // Сахар. – 2001. – № 5. – С. 23–25.
7. Эффективность применения антисептических средств на основе активного хлора в производстве сахара / [Н. А. Гусятинская, М. П. Купчик, Л. Р. Решетняк и др.] // Сахар-2008 : сб. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2008. – Ч. I – С. 62–67.
8. Технологічна інструкція по використанню для дезінфекції напівпродуктів, обладнання, технологічних вод на підприємствах цукрової галузі дезінфекційного засобу «Жавель-Клейд» / М. П. Купчик, Н. А. Гусятинська, Т. М. Чорна, С. М. Тереріна. – К. : НУХТ. 2007. – 23 с.
9. Колчинский Е. В. Опыт применения дезинфектанта нового поколения «Нобак» на сахарных заводах Украины, России, Латвии / Е. В. Колчинский, Л. П. Станиславский // Сахар – 2006 : сб. науч. трудов VI ежегодной междунар. науч.-практ. конф. – М. : ИК МГУПП, 2006. – С. 36–44.
10. Савич А. Н. Научные достижения сахарной отрасли Украины / А. Н. Савич // Ресурсосберегающие технологии – основное направление развития сахарной промышленности : материалы науч.-практ. конф. – Курск : РНИИСП, 2002. – 136 с.
11. Пат. № 51733. UA, МПК (2009) С 13 D 1/00. Спосіб дезінфекції клеровки тростинного цукру-сирцю / Гусятинська Н. А., Ліпец А. А., Романченко Н. М., Тереріна С. М., Косенко К. І., Бондар Л. М. ; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. – № u 201002098; заявл. 25.02.2010; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.

References

1. Bugaenko, I. F. (2000), Increase of the efficiency of raw cane sugar processing. Moscow: Teller, 296 p. [in Russian].
2. Sapronov, A. R. and Kolcheva, R. A. (1975), Colouring matters and their impact on sugar quality. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 306 p. [in Russian].
3. Nakhodkina, V. Z. (1975), Microbiology and microbiological control in sugar-beet production. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 94 p. [in Russian].
4. Husyatyn'ska, N. A. (2010), Peculiarities of microbiological control in sugar production from raw cane sugar. *Tsukor Ukrainy*, (3). Kyiv: NATsU, pp. 32–36 [in Ukrainian].

5. Husyatyn'ska, N. A., Teterina, S. M. and Romanchenko, N. M. (2011), Analysis of microbiological processes during raw cane sugar processing. *Kharchova promyslovist'*, (10), pp. 8–12 [in Ukrainian].
6. Gorchinskiy, Yu. N., Potapov, O. A. and Nikonenko, F. P. (2001), The technology of obtaining of superpurity sterilized sugar from sand sugar. *Sakhar*, (5), pp. 23–25 [in Russian].
7. Gusyatynskaya, N. A., Kupchik, M. P., Reshetnyak, L. R. et al. (2008), The efficiency of application of antiseptic agents, based on available chlorine, in sugar production. *Sakhar-2008*: proceed. of VIII Internat. scient.-pract. conf. Part I. Moscow, pp. 62–67 [in Russian].
8. Kupchyk, M. P., Husyatyn'ska, N. A., Chorna, T. M. and Teterina, S. M. (2007), Technological directions on disinfection "Javel-Kleyd" means for the disinfection of semi-products, equipment, process water at sugar industry enterprises. Kyiv: NUKhT, 23 p. [in Ukrainian].
9. Kolchinskiy, E. V. and Stanislavskiy, L. P. (2006), Experience of the use of new generation disinfectant "Nobak" at sugar plants of Ukraine, Russia, Latvia. *Sakhar – 2006*: proceed. of VI annual internat. scient.-pract. conf. Moscow: IK MGUPP, pp. 36–44 [in Russian].
10. Savich, A. N. (2002), Scientific achievements of sugar industry of Ukraine. *Resursosberegayushchie tekhnologii – osnovnoye napravleniye razvitiya sakharnoy promyshlennosti*: materials of scient.-pract. conf. Kursk: RNIISP, 136 p. [in Russian].
11. Husyatyn'ska, N. A., Lipyets, A. A., Romanchenko, N. M., Teterina, S. M., Kosenko, K. I. and Bondar, L. M. (2009), Pat. № 51733. UA, MPK C 13 D 1/00. The method for disinfection of melt liquor of raw cane sugar. Applicant and patentee National University of Food Technologies, № u 201002098; appl. 25.02.2010; publ. 26.07.2010, Bull. № 14 [in Ukrainian].

N. A. Gusyatyn'ska, *Dr.Tech.Sc., professor*,
e-mail: NGusiatynska@ukr.net

N. M. Romanchenko, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: NataRomano@ukr.net

S. M. Teterina, *Ph.D., associate professor*
e-mail: teterina_s@ukr.net

National University of Food Technologies
Volodymyrska str., 68, Kyiv, 01601, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE SCHEME FOR CLEARANCE OF RAW CANE SUGAR MELT WITH THE USE OF AVAILABLE CHLORINE-BASED MEANS

Among the urgent problems of improving the quality of the finished product it is necessary to determine issues related to the study of the microflora of raw cane sugar, the development of modern disinfection measures in the production of white sugar.

The aim of the research is to determine the optimal concentrations of "Javel-Kleyd" means for suppression of major groups of microorganisms - contaminants of raw cane sugar and provide disinfection effect of obtained melt liquor. Microbiological products factors when used to disinfect melt liquor of raw cane sugar by formalin means in an amount of 0,005% by the weight of sugar are investigated. The results indicate a significant level of microbiological contamination of production.

This article describes the research of disinfectant action of aqueous solution of sodium salt of dichloroisocyanuric acid on the main contaminants in the production of white sugar from raw cane sugar. The efficiency of application of «Javel-Kleyd» means for the suppression of slime-forming bacteria is determined. The method for disinfection of melt liquor of raw cane sugar is designed, its implementation allows effective disinfection of melt liquor at low cost of disinfectant «Javel-Kleyd», namely from 0,0001 to 0,0003 % by weight of raw cane sugar. It will both help to improve technological parameters of finished products and to achieve the compliance of current standard indicators on the allowable content of different groups of microorganisms in white sugar.

Key words: raw cane sugar, melt liquor, slime-forming microorganisms, disinfection.

Статтю представляє Н. А. Гусятинська, д.т.н., професор, Національний університет харчових технологій (Київ).

С. О. Білокінь, к.т.н., старший викладач
Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
marsaua001@gmail.com

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

В роботі описано методику модифікування зондів атомно-силового мікроскопа методом термовакуумного осадження з подальшою електронною обробкою для дослідження біологічних об'єктів (на прикладі людського волосся) в контактному режимі. Показано можливість надійного електростатичного кріплення об'єктів на підкладці та обрано оптимальні режими дослідження. Показано, що конічні зонди з кутом схилу близько 70°, радіусом вістря близько 50 нм, закріплені на консолі з жорсткістю не більше 0,05 Н/м, позбавляють таких артефактів, як контактна деформація та конволюція. Проаналізовано результати дослідження чотирьох типів волосся, що піддавались різного роду хімічній обробці, а також встановлено, що використання хімічних засобів для обробки волосся дуже впливає на його геометричні параметри. Показано, що використання хімікатів для фарбування, а також хімічної завивки призводить до розширювання волосся, в результаті чого можлива втрата здатності волосся утримувати вологу, порушується однорідна провідність поживних речовин.

Ключові слова: атомно-силова мікроскопія; біологічні об'єкти; підготовка біологічних зразків; хімічна обробка волосся.

На сьогоднішній день все більш стрімких темпів розвитку набуває така галузь науки, як нанотехнології, що пов'язано з мініатюризацією об'єктів і компонентів майже в усіх галузях науки і техніки. Проте вирішення такої задачі неможливе без сучасних методів і засобів маніпулювання та дослідження в нанометричному діапазоні [1]. Серед існуючих методів найбільшої популярності набув метод атомно-силової мікроскопії як такий, що має високу точність, надійність та відтворюваність отриманих результатів [2]. Окрім цих переваг, метод АСМ не має обмежень по середовищах [3, 8, 9], в яких проходить дослідження (вакуум, повітряне середовище або рідина). Оскільки основною умовою дослідження структури біологічних об'єктів (білків, мембранних клітин, внутрішньобіоструктурованих клітин тощо) є їх перебування в фізіологічних розчинах, то метод атомно-силової мікроскопії є практично єдиним і унікальним методом для дослідження біологічних об'єктів, а саме дослідження є актуальним через можливість виявлення причин порушень у біологічних структурах з подальшим їх униканням [4, 7].

Метою роботи є вивчення і аналіз людського волосся різних типів (як оброблених різними хімічними засобами, так і необроблених) методом АСМ для визначення ступеня та

причин їх пошкодження залежно від типу хімічної обробки.

В роботі автором досліджувалось людське волосся різного типу з попередньою різноманітною хімічною обробкою з метою порівняння і виявлення механізму впливу тих чи інших засобів на стан волоссяного покриву людини.

Як досліджувані зразки використовувались зразки волосся чотирьох типів, а саме: 1 – нефарбоване, натуральне волосся; 2 – фарбоване волосся після хімічної завивки; 3 – сиве волосся; 4 – фарбоване волосся без хімічної завивки.

Як підкладку при дослідженні біологічних об'єктів зазвичай використовують підкладки з рівною поверхнею, такі як атомарно-гладкі сколи слюди, високоорієнтований піролітичний графіт, плівки металів та напівпровідників. Такий вибір обумовлений можливістю подальшої модифікації біологічних об'єктів, а гладкість поверхні, близької до ідеальної, зменшує кількість артефактів.

При скануванні біологічних об'єктів важливим етапом є закріплення досліджуваного зразка на підкладці, оскільки недотримання цього етапу може призвести до зміщення і навіть відриву об'єктів від підкладки через латеральний рух зонду. В цьому випадку досліджуваний зразок закріплювався неру-

хомо за допомогою дії електростатичних сил. Для цього зразок, що знаходиться в робочому розчині буфера, наносять на підкладку, а сама підкладка попередньо оброблюється катіонами металів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , La^{2+}). Іони в цьому випадку виступають своєрідними «містками» між негативно зарядженим зразком і негативно зарядженою слидою. Попередньо також оброблювалася підкладка: свіжесколоту слиду на кілька годин розміщують у розчин, що містить іони металів, після чого промивають дистильованою водою для видалення надлишку катіонів, за чим йде нанесення зразка із буфера [5].

Для дослідження біологічних об'єктів основною проблемою є вибір зондів, оскільки вибір гострих тонких зондів призводить до деформації досліджуваного зразка, а кулькоподібні зонди є причиною виникнення такого артефакту, як конволюція. Довжина і ширина зонда не мають впливу на результат дослідження, на відміну від геометрії зондів. Так, кут сходження конуса вістря повинен бути якомога більшим (близько 70°). Не менш важливим є радіус округлення вістря зонда, а саме: чим більший радіус (близько 50 нм), тим більша якість отриманих результатів.

Одним із основних матеріалів, що використовуються для виготовлення зондів АСМ, є кремній, який за своєю природою є гідрофобним матеріалом. Проте на повітрі на поверхні кремнію утворюється шар діоксиду кремнію, який адсорбує вуглеводневі молекули та молекули води, внаслідок чого поверхня зонда набуває гідрофільних властивостей, що є неприпустимим для дослідження біологічних об'єктів.

Для зменшення кута змочування зондів пропонується їх модифікація тонким вуглецевим покриттям методом резистивного нанесення в вакуумі з подальшою електронною обробкою.

Процес комбінованого отримання тонких вуглецевих покриттів на зондах АСМ ґрунтується на методі комбінованого термовакуумного формування впорядкованих наноструктур на діелектричних поверхнях, в основу якого покладене термічне осадження у вакуумі тонких та ультратонких (близько 5...8 нм) високооднорідних покриттів з подальшим формуванням на них впорядкованих структур нанометричних розмірів.

Особливістю такого комбінованого методу є здійснення його в одному технологічному циклі «термовакuumне осадження – еле-

ктронно-променева модифікація покриття» за незмінних умов робочого середовища (вакуум $p = 5 \cdot 10^{-5}$ Па), що виключає утворення хімічних сполук осаджуваного покриття з елементами докільця на проміжному етапі формування наноструктури.

Процес формування покриття (рис. 1) здійснюється резистивним осадженням порошка С (графітна форма, дисперсність 0,12...0,32 мкм) за таких режимів: струм нагрівача – 90 А; час осадження – 7 с; відстань від навіски з порошком до поверхні, на яку здійснюється осадження, становить 30 мм (кут розпилювання – 120°).

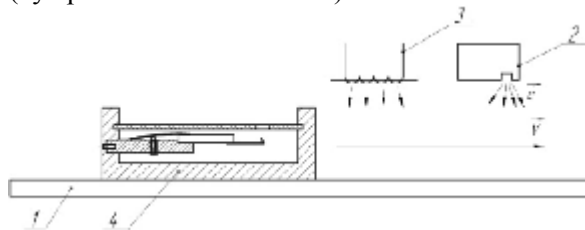


Рис. 1. Схема пристрою для обробки зразків:

- 1 – механізм переміщення; 2 – піч нагріву;
- 3 – електронно-променева гармата; 4 – зразок

На наступному етапі здійснюється формування наноструктур на покриттях шляхом їхньої термічної обробки. Застосування в цьому випадку стрічкового електронного потоку, генерованого електронно-променевою гарматою Пірса, пов'язане з високою однорідністю і керованістю розподілу енергії в такому потоці, що дозволяє досягти більш ощадного режиму прецизійної електронно-променевої обробки ультратонких покриттів на поверхнях кремнієвих зондів. Це, у свою чергу, виключає відшарування і розтріскування таких покриттів, чим обов'язково супроводжується процес різкого перерозподілу теплової енергії, пов'язаний з термічним ударом, який спостерігається при обробці точковими джерелами.

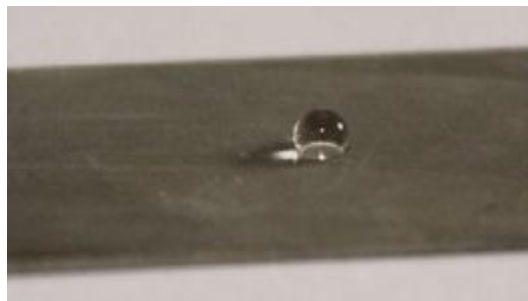
Електронно-променева модифікація покриттів здійснюється через маску за таких режимів: питома потужність електронного потоку – 500 Вт/м^2 ; струм електронного потоку – 60 мА; час дії – $4 \cdot 10^{-6}$ с.

Після припинення процесу осадження відбувається витримка протягом 10...15 с при постійній температурі $360 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Сканування проводилось у контактному режимі за таких параметрів: швидкість сканування по горизонталі – $V_{\text{гор}} = 9,08 \dots 10,2 \text{ мкм/с}$, час затримки перед вимірюванням – $\tau \geq 6 \text{ мс}$, крок сканування – $h \leq 82 \text{ нм}$. Слід зазначити, що жорсткість консолі не повинна перевищувати

0,01 Н/м, оскільки великий тиск на біологічні об'єкти призводить до їх руйнації [6, 10].

Поєднання оптимальних режимів дослідження і використання зондів, модифікованих вуглецевим покриттям, дозволяє збільшити кут змочування зондів з 60° до 110° (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Фотознімки крапель дистильованої води на гідрофобній кремнієвій пластині (а) та гідрофільній пластині, поверхня якої містить діоксид кремнію (б)

Аналіз АСМ-топограми першої групи зразків, а саме нефарбованого, натурального волосся, показав рівномірний розподіл (перепад шорсткості не перевищує 80 нм) структури такого волосся, що може свідчити про цілісність волоссяного стовбура і нормальний обмін речовин у ньому (рис. 3).

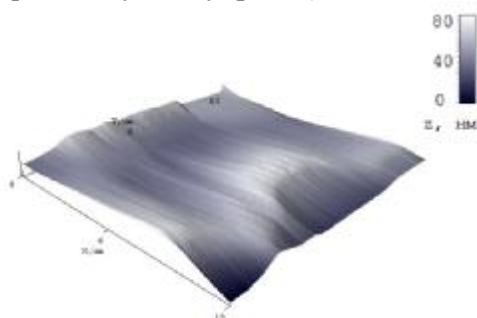


Рис. 3. Тривимірне АСМ-зображення нефарбованого, натурального волосся

При дослідженні другої групи волосся (фарбованого після хімічної завивки) спостерігається високий контраст рельєфу волоссяного стовбура (рис. 4), а максимальний перепад шорсткості сягає 450 нм.

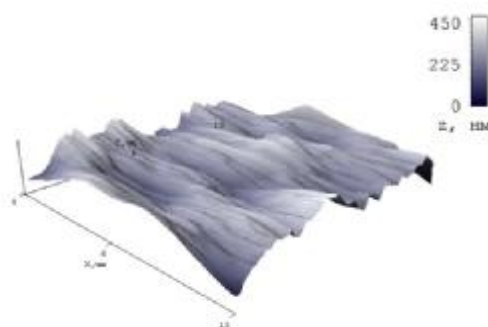


Рис. 4. Тривимірне АСМ-зображення фарбованого волосся після хімічної завивки

Це може свідчити про пошкодження поверхні волосся, внаслідок чого змінюється процес обміну поживними речовинами в структурі волосся і відбувається «омертвіння» волоссяного стовбура.

АСМ-зображення третьої групи волосся (сиве волосся) вказує на збільшення лусок (рис. 5), проте мікрогеометрія волоссяного стовбура залишається нерозвиненою (порівняно з мікрогеометрією волосся другої групи).

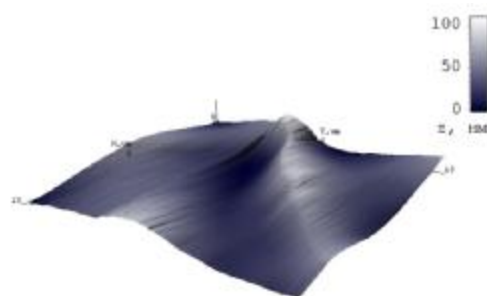


Рис. 5. Тривимірне АСМ-зображення сивого волосся

Результат дослідження четвертої групи волосся (рис. 6) схожий з результатом другої групи, проте розподіл мікрогеометрії не такий сильний (на 20-30 % менший) порівняно з волоссям третього типу.



Рис. 6. Тривимірне АСМ-зображення фарбованого волосся без хімічної завивки

Таким чином, як показали результати дослідження, використання хімічних засобів для обробки волосся дуже впливає на його геометричні параметри. Показано, що викори-

стання хімікатів для фарбування, а також хімічної завивки призводить до розшарування волосся (максимальний перепад шорсткості становить 450 нм, в результаті чого можлива втрата здатності волосся утримувати вологу) і викликає порушення однорідної провідності поживних речовин. При дослідженні нефарбованого, натурального волосся спостерігався неконтрастний розподіл рельєфу (максимальний перепад шорсткості становить близько 80 нм), що свідчить про нормальний розподіл поживних речовин по волоссяному стовбуру. АСМ-зображення сивого волосся вказує на збільшення лусок, проте мікрогеометрія волоссяного стовбуру залишається нерозвиненою (порівняно з мікрогеометрією фарбованого волосся з хімічною завивкою).

Список літератури

1. Приборы и методы зондовой микроскопии / Дедкова Е. Г. [и др.] – М. : Можайский полиграфический комбинат, 2011. – 160 с.
2. Мікроскопія в нанотехнологіях : монографія / Антонюк В. С. [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 336 с.
3. Методи та засоби мікроскопії : монографія / Антонюк В. С. [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 260 с.
4. Дрозд Е. С. Метод оценки локальных упругих свойств биологических клеток на базе атомно-силовой микроскопии / Е. С. Дрозд, С. А. Чижик // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : материалы IX Междунар. конф., 12-15 октября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 124–129.
5. Моделювання електростатичної взаємодії зонда атомно-силового мікроскопа з діелектричною поверхнею / С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, В. О. Андрієнко, С. В. Храпатий // Збірник наукових праць. – 2014. – Вип. 2 (41). – С. 233–237. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).
6. Формування зносостійких покриттів на кремнієвих зондах для атомно-силової мікроскопії термовакuumним випаровуванням / [В. С. Антонюк, С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та ін.] // Сверхтвердые материалы. – 2015. – № 2. – С. 60–69.
7. Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії при комплексному контролі елементів приладів точного приладобудування / [В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко та ін.] // Перспективні технології та прилади : зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 5. – С. 5–9.

8. Исследование микротвердости тонких пленок методом наноиндентирования с помощью атомно-силовой микроскопии / С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк, В. А. Андриенко // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : 13-я Междунар. науч.-практ. конф., 30 сентября – 04 октября 2013, материалы докл. – Крым, Ялта, Киев, 2013 – С. 20–21.
9. Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий нанoeлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа / [С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : XI Междунар. конф., 21-24 октября 2014 г., сб. докл. – Минск, Беларусь, 2014. – С. 164–168.
10. Формування функціональних наноструктур на діелектричних поверхнях термічним випаровуванням у вакуумі / В. С. Антонюк, С. В. Храпатий, С. О. Білокінь, В. О. Андрієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2014. – № 1 (70). – С. 31–35. – (Серія «Машинобудування»).

References

1. Dedkova, E. G. et al. (2011), Devices and methods of probe microscopy. Moscow: Mozhayskij poligraficheskij kombinat, 160 p. [in Russian].
2. Antoniuk, V. S. et al. (2013), Microscopy in nanotechnology. Kyiv: NTU "KPI", 336 p. [in Ukrainian].
3. Antoniuk, V. S. et al. (2014), Methods and means of microscopy. Kyiv: NTU "KPI", 260 p. [in Ukrainian].
4. Drozd, E. S. and Chizhyk, S. A (2010), The method of estimation of local elastic properties of biological cells based on atomic force microscopy. *Metodologicheskiye aspekty skaniruyushchey zondovoy mikroskopii*: proceed. of IX Internat. conf., October 12-15. Minsk, pp. 124–129 [in Russian].
5. Bilokin', S. O., Antoniuk, V. S., Andrienko, V. A. and Hrapaty, S. V. (2014), Simulation of electrostatic interaction of the probe of atomic force microscope with dielectric surface. *Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo*, Vol. 2 (41), pp. 233–237 [in Ukrainian].

6. Antoniuk, V. S., Bilokin', S. O., Bondarenko, M. O. et al. (2015), Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermovacuum evaporation. *Sverkhtverdnye materialy*, (2), pp. 60–69 [in Ukrainian].
7. Antoniuk, V. S., Bondarenko, Ju. Ju., Bondarenko, M. O. et al. (2014), Prospects for the use of the method of atomic force microscopy with integrated control of precision instrumentation elements. *Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady*: collected works, (5), pp. 5–9 [in Ukrainian].
8. Bilokon', S. A., Bondarenko, M. A., Antoniuk, V. S. and Andrienko, V. A. (2013), A study of microhardness of thin films by nanoindentation method with the help of atomic force microscopy. *Kachestvo, standarti-zatsiya, kontrol': teoriya i praktika*: 13th Internat. scient. and pract. conf., September, 30 – October, 4, reports materials. Crimea, Yalta, Kiev, pp. 20–21 [in Russian].
9. Bilokon', S. A., Bondarenko, M. A., Bondarenko, Ju. Ju. et al. (2014), Minimization of the effect of capillary forces in the study of surfaces of nanoelectronics products in AFM contact mode. *Metodologicheskiye aspekty skaniruyushchey zondovoy mikroskopii*: XI Internat. conf., October, 21–24, reports collection. Minsk, Belarus, pp. 164–168 [in Russian].
10. Antoniuk, V. S., Hrapaty, S. V., Bilokin', S. O. and Andrienko, V. A. (2014), Formation of functional nanostructures on dielectric surfaces by vacuum thermal evaporation. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny "Kyyivs'kyi politekhnichnyi instytut"*. Seriya: Mashynobuduvannya, 1 (70), pp. 31–35 [in Ukrainian].

S. O. Bilokin', *Ph.D., senior lecturer*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
marsaua001@gmail.com

COMPLEX STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL OBJECTS

The aim of this work is to study and analyze various types of human hair (both processed by various chemicals and non-processed) by atomic force microscopy (AFM) to determine the degree and causes of damage depending on the type of chemical treatment. In this paper, the author has researched human hair of various types with preliminary diverse chemical treatment in order to compare and identify the mechanism of influence of various things on the hair-covering state. The paper describes a research method of biological objects (for example, of human hair) using AFM in contact mode. The possibility of safe electrostatic bindings of objects on surface-supported has been shown and the optimal modes of research have been selected. It is shown that cone-shaped probe with rake angle of about 70°, the edge radius of about 50 nm, fixed on the console with hardness not exceeding 0.05 N/m to minimize artifacts, such as contact deformation and convolution. The results of the research of four hair types, which has been undergone by kinds of chemical treatment, have been analyzed and it is found that the use of chemicals for hair treatment strongly affects its geometrical parameters. It is shown that the use of chemicals for coloring and perming leads to hair stratification (maximum of roughness difference is 450 nm) and in the result it is possible to lose the hair's ability to retain moisture and cause a breach of homogeneous conductivity of nutrients. Through studies of uncolored, natural hair there was no contrast of relief distribution and it indicates normal distribution of nutrients on the hair shaft. AFM images of gray hair indicate scales increase, however microgeometry of hair shaft is well-developed (compared to microgeometry of colored hair with perming).

Keywords: atomic force microscopy; biological objects; preparation of biological samples; chemical hair treatment.

Рецензенти: В. А. Ващенко, д.т.н., професор,
В. С. Антонюк, д.т.н., професор

В. В. Мельник, к.е.н., доцент,

apbkafhm@gmail.com

І. П. Частокієнко, к.ф.-м.н., доцент,

apbkafhm@gmail.com

А. П. Марченко, викладач

apbkafmap@gmail.com

Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОГО ФАКТИЧНОГО ЧАСУ ВИКОНАННЯ ОДНОГО ЕТАПУ БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНИХ РОБІТ В УМОВАХ ЗБУРЮЮЧИХ ВПЛИВІВ

У статті запропоновано математичну модель визначення середнього фактичного часу виконання одного етапу будівельно-монтажних робіт в умовах збурюючих впливів. Враховано вплив параметрів двох типів: множини постійно діючих факторів на даному виробничому етапі і множини імовірно діючих збурюючих впливів. Моделювання здійснювалося як з урахуванням підготовчого періоду, на якому безпосередньо виконання фронту робіт не здійснюється, так і без нього.

Під час моделювання застосовувався метод введення додаткової події з пуассонівським характером розподілу. Отримано величину, яка характеризує середньофактичний час виконання одного етапу фронту робіт, не пов'язаного з іншими в умовах збурюючих впливів.

Ключові слова: процеси напруження, середня швидкість зростання, обсяг робіт, затримуюче зривання, руйнуюче зривання, випадкове зривання, додаткова подія, час реалізації, інтервал відновлення, інтенсивність впливу.

Постановка проблеми. Будівництво є однією з основних галузей народного господарства, яка вимагає високої організації виробничих процесів.

Будь-який процес складається із взаємопов'язаних операцій і вимагає належної організації планування. Виробничі потоки інтегровані з проектних, технічних, фінансових та інших процесів, тому важливою є їх чітка взаємодія, яка забезпечить їхню неперервність та ефективність [3].

Оскільки будівельний процес є динамічним і значною мірою залежить від навколишнього середовища, то актуальним є передбачення і врахування його впливу на час виконання окремих етапів будівельно-монтажних робіт.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Показано, що сучасний стан науково-технічної проблеми математичного моделювання в галузі будівництва при обмеженому обсязі статистичної інформації – це логічне продовження робіт таких вчених, як: В. С. Немчинов, В. В. Новожилов, М. П. Бусленко, Р. Белман та інших [4–6]. Однак очевидно, що нині на практиці використовуються моделі з досить обмеженими можливостями стосовно адекватного [7–8] відображення

реальних процесів будівництва. Пріоритетним шляхом вирішення проблеми вважається побудова локальних математичних моделей і методів їх реалізації на ЕОМ [4–5].

Мета роботи ґрунтується на математичному моделюванні визначення середнього фактичного часу виконання одного етапу будівельно-монтажних робіт в умовах збурюючих впливів.

Виклад основного матеріалу. Для математичного опису процесу виконання фронту робіт на окремому виробничому циклі необхідно інтерпретувати виконання обсягу робіт як безперервно змінний у часі показник, який залежить від впливу параметрів двох типів. До першого типу відноситься множина постійно діючих факторів на виробничому етапі, які обумовлені:

- особливостями забезпечення виконання обсягу робіт (необхідний інвентар, приміщення, обладнання, зовнішньо-кліматичні умови і т.д.);

- рівнем матеріально-технічної бази (якістю і кількістю обладнання, недостатньою потужністю розчинного вузла, основних і допоміжних приміщень, обслуговуючого персоналу і т.д.);

- необхідними витратами (продуктивною роботою, технологічними перервами, відпочинком і особистими потребами, підготовчо-заключною роботою).

До другого типу відноситься множина імовірно діючих збурюючих впливів, тобто таких, момент настання, тривалість і характер впливу яких завчасно розрахувати неможливо [2].

Вони визначаються:

- збоями в постачанні бетону, розчину, транспорту, цементу, інертних і лісових матеріалів, а також виробів з них, залізобетонних виробів і конструкцій, металовиробів і конструкцій, цегли, інших матеріалів;

- простоями через несправність або відсутність машин, механізмів, інструменту, більшу нормативної кількості робочих у бригадах, непідготовленість робочого місця після завершення попереднього процесу, відсутність вказівок технічного персоналу, метеоумови та з інших причин;

- порушеннями технології, в результаті яких доводиться переробляти певний фронт робіт;

- порушеннями трудової дисципліни і наднормованим відпочинком, запізненням, збільшенням часу обіду, передчасним зупиненням роботи, відволіканням невиробничого характеру.

Баланс робочого часу міністерств та їх підрозділів визначається за результатами фотографії робочого дня в одиницях витрат робочого часу (люд. год і %) [3].

У рамках описуваних моделей реалізація впливу множини постійних параметрів буде визначати середню «швидкість» виконання обсягу робіт, що характеризується деяким коефіцієнтом K , який визначимо як співвідношення запланованого приросту обсягу виконаних робіт B до сумарного робочого часу на досліджуваному етапі:

$$K = B/\eta. \quad (1)$$

Коефіцієнт K можна інтерпретувати як «темп» виконання цього фронту робіт. Він залежить від таких параметрів, як: кількість людей, техніки, погодні умови і т.д. Вплив множини імовірнісних факторів в описаних конструкціях ми будемо класифікувати або як затримуючий, або знижуючий (руйнівний). А саме: ми будемо називати затримуючими ті ймовірнісні фактори, в момент закінчення впливу яких результат виконання фронту робіт залишається на колишньому рівні, тобто буде дорівнювати відповідному результату до

моменту початку впливу зазначених параметрів. Знижуючі – ті, після яких виконання фронту робіт необхідно починати заново, тобто до моменту закінчення впливу. Результат виконаного обсягу робіт дорівнює вихідному нульовому рівню, який був у момент початку досліджуваного періоду і пов'язаний з виконанням фронту робіт.

Зазначимо, що еволюція в часі процесу виконання фронту робіт не завжди є такою, як у вищеписаній моделі. В ряді випадків при складанні моделі процесу виконання фронту робіт необхідно враховувати наявність підготовчого етапу, на якому безпосередньо виконання фронту робіт не відбувається [10]. Далі під моделлю I будемо розуміти модель, в якій ця обставина не враховується (підготовчий етап відсутній), а під моделлю II – модель, у рамках якої враховується наявність етапу, на якому не планується збільшення обсягу фронту робіт, що виконується.

Опишемо моделі процесу виконання заданого обсягу робіт за допомогою конструкцій, які в термінології технічних систем називаються процесами напрацювання [8, 9]: $\Omega(t)$. В будь-який момент часу запланований фронт робіт виконується або не виконується.

Визначимо $V(t) = 0$, якщо в момент (t) намічений фронт виконання робіт не виконується, а $V(t) = 1$, якщо програма виконання фронту робіт виконується.

Тоді

$$N(t) = \int_0^t V(x)dx \quad (2)$$

– чистий відпрацьований час до моменту t . З процесом $N(t)$ пов'язують так званий процес напрацювання $\Omega(t)$, визначений таким чином:

$$\Omega(t) = N(t) - \int_0^{\tau_t} V(x)dx, \quad (3)$$

де τ_t – момент останнього руйнівного зривання виконання фронту робіт на інтервалі $(0, t)$, після якого підготовку об'єкта необхідно відновити з вихідного рівня результату згідно з розробленим планом.

Стосовно досліджуваної конструкції необхідним є деяке узагальнення зазначеного процесу, щоб враховувати середню «швидкість» зростання виконання фронту робіт, а саме: нехай K – константа, що характеризує середній приріст обсягу робіт в одиницю часу. Визначимо процес $\Omega_k(t)$ рівністю

$$\Omega_k(t) = KN(t) - K \int_0^{\tau_t} V(x)dx. \quad (4)$$

Введений нами процес $\Omega_k(t)$ апроксимує процес виконання фронту робіт. При цьому величина K дозволяє враховувати сере-

дній «темп» зростання обсягу фронту робіт в моделі I.

Зауваження. Значення коефіцієнта K фактично визначається нормативними документами, досвідом практичної реалізації цього типу робіт [5]. Під час виконання запланованого фронту робіт (тобто коли $V(t) = 1$) на інтервалі $(t, t + dt)$ може виникнути або затримуюче зривання з імовірністю $\alpha_0 dt$, або знижуюче (руйнівне) – з імовірністю $\alpha_1 dt$, в результаті якого запланований фронт робіт не буде виконуватися протягом певного робочого часу. Тривалості зривань зазначених видів – випадкові величини, відповідно, Ψ_0 та Ψ_1 з довільними законами розподілу. На проміжках Ψ_0 і Ψ_1 заплановане завдання не виконується. Для моделі I визначимо, що якщо зривання в ході виконання фронту робіт сталося в момент t' , а його відновлення – в момент t'' , тоді $V(t) = 0$ при $t \in (t', t'')$. Крім того, у випадку затримуючого збою ходу виконання фронту робіт

$$\Omega_K(t'' + 0) = \Omega_K(t' - 0). \quad (5)$$

При руйнівному зриванні $\Omega_K(t'' + 0) = 0$. Отже, руйнівне зривання повертає процес напрацювання $\Omega_K(t)$ до вихідного початкового рівня. Для моделі II, крім того, на проміжку виконання підготовчого етапу η_0 маємо $V(t) = 0$. При цьому, у випадку збою затримуючого характеру на проміжку $t \in (t', t'')$ також маємо

$$\Omega_K(t'' + 0) = \Omega_K(t' - 0). \quad (6)$$

У випадку руйнівного зривання $\Omega_K(t'' + 0) = 0$. Отже, таке зривання повертає процес $\Omega_K(t)$ до початкового рівня, при цьому виконання запланованого фронту робіт починається з самого початку з урахуванням підготовчого періоду.

Виведення основних співвідношень для часу виконання фронту робіт. Випадок виконання обсягу робіт з нульового рівня. Нехай $\eta_1(B, x)$ – час досягнення процесом напрацювання $\Omega_K(t)$ (модель I) рівня B за умови, що $\Omega_K(0) = x$. Зрозуміло, що $\eta_1(B, x)$ – випадкова величина. Позначимо через $\bar{\eta}_1(B, x)$ математичне сподівання цієї випадкової величини. Інакше кажучи, $\eta_1(B, x)$ – час виконання запланованого обсягу робіт B при середньому «темпі» K з урахуванням впливу випадкових зривань, коли виконання фронту робіт починається з рівня x , де $(0 \leq x \leq B)$. Перетворення Лапласа–Стілт'єса для функції розподілу випадкової величини $\eta_1(B, x)$ позначимо через $\eta_1(B, x, S)$. Очевидно, що мате-

матичне сподівання $\bar{\eta}_1(B, x)$ визначається рівнянням

$$\bar{\eta}_1(B, x) = -\frac{\frac{\partial}{\partial S} \eta_1(B, x, S)}{S} = 0. \quad (7)$$

Знайдемо $\eta_1(B, x, S)$. Рівняння, що визначає цю функцію, легко отримати методом введення додаткової події [1], а саме: за допомогою потоку катастроф. Візьмемо число $S > 0$ і припустимо, що відбуваються деякі катастрофи, моменти настання яких утворюють пуассонівський процес з параметром S . Тоді число $\eta_1(B, x, S)$ є імовірністю того, що за час реалізації фронту робіт $\eta_1(B, x)$ не відбудеться ніякої катастрофи. Назвемо інтервали відновлення Ψ_0 і Ψ_1 «негативними» або «позитивними» залежно від того, настає чи не настає на цих інтервалах катастрофа. Тоді $(1 - \Psi_0(S))$ – імовірність того, що інтервал Ψ_0 «негативний»; $\Psi_1(S)$ – імовірність того, що інтервал Ψ_1 – «позитивний». Крім того, $g(S) = \alpha_0 + \alpha_1 + S - \alpha_0 \Psi_0(S)$ – параметр найпростішого потоку катастроф, руйнівних зривань і «негативних» неруйнівних зривань. При цьому α_0 – інтенсивність кількості простоїв (середня кількість простоїв в одиницю часу), а α_1 – інтенсивність впливу знижуючих факторів. Позначимо: $\bar{\Psi}_0$ – середній час дії затримуючих факторів (середні втрати на один простій); $\bar{\Psi}_1$ – середні втрати на простій для руйнуючих факторів при виявленні непродуктивних витрат (транспортні та вантажно-розвантажувальні роботи, порушення технологічної послідовності виконання робіт, виправлення браку, пошкодження і низька якість попередніх робіт, що викликано неправильністю вказівок інженерно-технічного регламенту і дефектами проектної документації і т.д.), інакше кажучи – середній час дії знижуючих факторів при одному зриванні. Тепер за допомогою нескладних міркувань, отримуємо наступне рівняння, що визначає функцію $\eta(B, x, S)$:

$$\eta(B, x, S) = \exp\left\{-\frac{(B-x)}{K} g(S)\right\} + [1 - \exp\left\{\frac{(x-B)}{K} g(S)\right\} \frac{\alpha_1}{g(S)} \cdot \Psi_1(S) \eta(B, 0, S)]. \quad (8)$$

Дійсно, для того щоб за час виконання фронту робіт $\eta(B, x)$ катастрофи не настали (імовірність цього дорівнює $\eta(B, x, S)$), необхідно і достатньо, щоб:

1) або за час досягнення планованого обсягу виконання фронту робіт $\eta(B, x)$ не відбулося жодної події наступного сумарного потоку: потоку катастроф і потоку руйнуючих зривань (для цього необхідно і достатньо, щоб на про-

міжку тривалості $\frac{B}{K}$ «чистого» відпрацьованого часу не настала жодна подія найпростішого сумарного потоку з інтенсивністю $g(S)$;

2) або за час виконання фронту робіт $\eta(B, x)$ настала хоча б одна подія зазначеного сумарного потоку з інтенсивністю $g(S)$, імовірність чого дорівнює $1 - \exp\left\{-\frac{(x-B)}{K}g(S)\right\}$, причому першою такою подією була руйнівна відмова системи (імовірність $\alpha_1/g(S)$), і за інтервал Ψ_1 плюс нова реалізація

розв'язування задачі з нульового рівня $\eta(B, 0)$ жодні катастрофи не мали місця (імовірність $\Psi_1\eta(B, 0, S)$). Застосовуємо формулу повної імовірності до виразу (8).

Оскільки на число S ми не накладали жодних обмежень, окрім $S > 0$, то рівність (8) справедлива для всіх $S > 0$. Використовуючи принцип аналогічного продовження, отримуємо, що ця рівність справедлива для будь-якого S з області $Re S > 0$. Зі співвідношення (8) при $x = 0$ випливає:

$$\eta(B, 0, S) = \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} + [1 - \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} \frac{\alpha_1\Psi_1(S)}{g(S)}] \cdot \eta(B, 0, S). \quad (9)$$

Звідси знаходимо $\eta(B, 0, S)$:

$$\eta(B, 0, S) [1 - (1 - \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} \frac{\alpha_1\Psi_1(S)}{g(S)})] = \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}; \quad (10)$$

$$\eta(B, 0, S) [g(S) - \alpha_1\Psi_1(S) + \alpha_1\Psi_1(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} / g(S)] = \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}. \quad (11)$$

$$\eta(B, 0, S) (g(S) - \alpha_1\Psi_1(S) + \alpha_1\Psi_1(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} / g(S)) = g(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}; \quad (12)$$

$$\eta(B, 0, S) = g(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} / g(S) - \alpha_1\Psi_1(S) + \alpha_1\Psi_1(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}. \quad (13)$$

Знайдена функція $\eta(B, 0, S)$ – перетворення Лапласа-Стілт'єса реального часу виконання фронту робіт, починаючи з самого початку в умовах випадкових збурень, для

реалізації якого в ідеальних умовах потрібно B одиниць і «чистого» (нормативного) часу. Домножимо обидві частини рівності (13) на $g(S)$, отримуємо:

$$g(S)\eta(B, 0, S) = g(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} + [1 - \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}] \cdot \alpha_1\Psi_1(S)\eta(B, 0, S). \quad (14)$$

Продиференціюємо цей вираз по S (в точці $S = 0$), враховуючи при цьому такі формули:

$$-\Psi'_0(S)/S = 0 = \bar{\Psi}_0,$$

$$-\Psi'_1(S)/S = 0 = \bar{\Psi}_1,$$

$$\Psi_0(0) = 1,$$

$$\Psi_1(0) = 1,$$

$$\eta(B, 0, S) = 1,$$

$$g(0) = \alpha_1,$$

$$g'(S) = 1 - \alpha_0\Psi'_0(S),$$

$$g'(S) = 1 - \alpha_0\Psi'_1(0) = 1 + \alpha_0\bar{\Psi}_0.$$

$$\begin{aligned} g'(S)\eta(B, 0, S) + g(S)\eta'(B, 0, S) &= g'(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} + g(S) \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} \left(-\frac{Bg'(S)}{K}\right) + \\ &+ \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\} \left(\frac{B}{K}g'(S)\alpha_1\Psi_1(S)\eta(B, 0, S) + \left[1 - \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}\right] \alpha_1\Psi_1(S)\eta(B, 0, S) + \right. \\ &\left. + \left[1 - \exp\left\{-\frac{B}{K}g(S)\right\}\right] \alpha_1\Psi_1(S)\eta'(B, 0, S)\right). \end{aligned} \quad (15)$$

При $S = 0$

$$(1 + \alpha_0\bar{\Psi}_0) \cdot 1 + \alpha_1(-\bar{\eta}(B, 0)) =$$

$$\begin{aligned}
&= (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0) \exp \left\{ -\frac{B}{K} \alpha_1 \right\} + \alpha_1 \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} \left(-\frac{B}{K} (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0) \right) + \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} \frac{B}{K} (1 + \\
&+ \alpha_0 \bar{\Psi}_0) \alpha_1 \cdot 1 \cdot 1 + \left[1 - \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} \right] \alpha_1 (-\bar{\Psi}_1) + \left[1 - \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} \right] \alpha_1 (\bar{\eta}(B, 0)) \alpha_1 (-\bar{\eta}(B, 0)) + \\
&+ \left[\exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} - 1 \right] \alpha_1 (-\bar{\eta}(B, 0)) = \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} \left(\alpha_0 \bar{\Psi}_0 + 1 + \alpha_1 \left(-\frac{B}{K} \right) \right) (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0) + \frac{B}{K} (1 + \\
&+ \alpha_0 \bar{\Psi}_0) \alpha_1 + \alpha_1 \bar{\Psi}_1) - \alpha_1 \bar{\Psi}_1 - (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0). \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&-\bar{\eta}(B, 0) (\alpha_1 + \alpha_1 \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0 - \frac{B \alpha_1}{K} - \alpha_0 \alpha_1 \bar{\Psi}_0 \frac{B}{K} + \left(\frac{B}{\alpha_1} \right) + \frac{B}{K} \alpha_0 \alpha_1 \bar{\Psi}_0 + \\
&+ \alpha_1 \bar{\Psi}_1) - \alpha_1 \bar{\Psi}_1 - \bar{\eta}(B, 0) \alpha_1 \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} = \exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} (1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0 + \alpha_1 \bar{\Psi}_1) - \alpha_1 \bar{\Psi}_1 - \\
&-(1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0); \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\bar{\eta}(B, 0) = \frac{h}{\alpha_1} (\exp \left\{ -\frac{B \alpha_1}{K} \right\} - 1), \quad (18)$$

де $h = 1 + \alpha_0 \bar{\Psi}_0 + \alpha_1 \bar{\Psi}_1$.

Величина $\bar{\eta}(B, 0)$ характеризує середній фактичний час виконання одного етапу фронту робіт в дослідженій моделі.

Висновки. Побудовано математичну модель процесу виконання фронту робіт на окремому виробничому циклі з урахуванням множини імовірно діючих збурюючих впливів, яка дає можливість розраховувати величину середнього фактичного часу виконання одного етапу фронту робіт, не пов'язаного з іншими етапами, а також характеризує його залежність від основних параметрів.

Список літератури

1. Бродецкий Г. Л. Эффективность запоминания промежуточных результатов в системах с отказами, разрушающими информацию / Г. Л. Бродецкий // Техническая кибернетика. – 1978. – № 6.
2. Климов Г. П. Стохастические системы обслуживания / Г. П. Климов. – М., 1966.
3. Недавний О. И. Обоснование времени производства строительных работ / О. И. Недавний, С. М. Кузнецов, Н. М. Кандаурова // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 9. – С. 107–114.
4. Оптимизация организационно-технологических решений при строительстве зданий и сооружений / С. М. Кузнецов, Н. А. Сироткин, К. С. Кузнецова, И. Л. Чулкова // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 9. – С. 57–60.
5. Хибухин В. П. Математические методы планирования и управления строительством / В. П. Хибухин, В. З. Величин, В. И. Втюрин. – Л. : Стройиздат, 1990. – С. 184.

6. Суворова А. П. Модели взаимодействия в интегрированных системах управления строительным комплексом / А. П. Суворова // Экономика строительства. – 2003. – № 9. – С. 49–59.
7. Сироткин Н. А. Имитационная модель обоснования очередности строительства объектов / Н. А. Сироткин, С. М. Кузнецов, С. Н. Ячменьков // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 10. – С. 30–31.
8. Сергеев В. И. Методологические основы и модели формирования макрологистических систем / В. И. Сергеев. – СПб. : СПбУЭиФ, 1990. – С. 30.
9. Семченков А. С. Проблемы гражданского строительства / А. С. Семченков // Бетон и железобетон. – 1995. – № 1. – С. 2–6.
10. Криводубский О. А. Математическая модель планирования строительно-монтажных работ / О. А. Криводубский, О. А. Шевчук // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2012. – Вип. 4 (33). – С. 144–148.

References

1. Brodeczkiy, G. L. (1978), Efficiency of intermediate results storing in the systems with failures which destroy the information. *Tekhnicheskaya kibernetika*, (6) [in Russian].
2. Klimov, G. P. (1966), Stochastic service systems. Moscow [in Russian].
3. Nedavniy, O. I., Kuznecov, S. M. and Kandaurova, N. M. (2013), Substantiation of the time for building production. *Izvestiya vuzov. Stroyitel'stvo*, (9), pp. 107–114 [in Russian].
4. Kuznecov, S. M., Sirotkin, N. A., Kuznecova, K. S. and Chulkova, I. L. (2009), Optimization of organizational and technolo-

- gical decisions at building and facilities construction. *Promyshlennoye i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (9), pp. 57–60 [in Russian].
5. Khibukhin, V. P., Velichkin, V. Z. and Vtyurin, V. I. (1990), Mathematical methods of construction planning and management. L.: Strojizdat, p. 184 [in Russian].
 6. Suvorova, A. P. (2003), Models of interaction in integrated systems of construction complex management. *Ekonomika stroitel'stva*, (9), pp. 49–59 [in Russian].
 7. Sirotkin, N. A., Kuznecov, S. M. and Yachmen'kov, S. N. (2007), Simulation model for substantiation of objects construction priority. *Put' i putevoye khozyajstvo*, (10), pp. 30–31 [in Russian].
 8. Sergeev, V. I. (1990), Methodological foundations and models for macrologistic systems formation. St. Petersburg: SPbUEiF, p. 30 [in Russian].
 9. Semchenkov, A. S. (1995), Problems of civil engineering. *Beton i zhelezobeton*, (1), pp. 2–6 [in Russian].
 10. Krivodubskiy, O. A. and Shevchuk, O. A. (2012), Mathematical model for planning of construction works. *Zbirnyk naukovykh pracz' Harkivs'kogo universytetu povitryanyh syl*, 4 (33), pp. 144–148 [in Russian].

V. V. Melnik, Ph.D., associate professor,
apbkafhm@gmail.com

I. P. Chastokolenko, Ph.D., associate professor,
apbkafhm@gmail.com

A. P. Marchenko, lecturer
apbkafmap@gmail.com

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University
 of Civil Defense of Ukraine
 Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF AVERAGE ACTUAL TIME FOR EXECUTION OF ONE STAGE OF CONSTRUCTION WORKS IN THE CONDITIONS OF PERTURBATIONS

Formulation of the problem. Construction is one of the main sectors of the economy that requires high organization of production processes.

Any process consists of interrelated transactions and requires proper planning organization. Workflows are integrated with design, technical, financial and other processes, so their clear interaction, that will ensure their continuity and effectiveness, is important.

As the process of construction is dynamic and largely depends on the environment, it is urgent to foresight and consider its impact on the time of execution of individual stages of construction works.

The main material. The article offers mathematical model for determination of average actual time for execution of one stage of construction works in the conditions of perturbations. The impact of parameters of two types: permanent factors set provided in manufacturing stage and the set of likely perturbations is taken into account. Modeling has been carried out both on the basis of preparatory period, on which direct execution of the field of operations is not carried out, and without it.

During the modeling the method of additional event with Poisson character of distribution has been used. A value that characterizes the average actual time for execution of one stage of operations not related to others in the conditions of perturbations is obtained.

Conclusions. Mathematical model of execution of the field of operations on a single production cycle, taking into account the set of likely perturbations, which makes it possible to count the value of the average actual time for execution of one stage of operations, not related to other stages, and describes its dependence on basic settings is built.

Keywords. development processes, average rate of increase, volume of work, additional event, implementation time, recovery interval, exposure intensity.

Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н., професор,
 С. В. Поздєєв, д.т.н., професор

Ю. Ю. Бондаренко, к.т.н., доцент,

К. В. Базіло, к.т.н., доцент,

В. М. Зайка, асистент

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

kafedra-kitp@rambler.ru

РОЗРОБКА МОНОМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВО-КУТОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ВЕКТОРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ВЕКТОРА ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Стаття присвячена подальшому удосконаленню п'єзоелектричних мономорфних перетворювачів з метою підвищення рівня звукового тиску. Традиційно вектор діючої на п'єзоелемент сили є паралельним вектору поляризації. Для отримання датчиків з заданими характеристиками при проектуванні п'єзоелектричних перетворювачів запропоновано підключати мономорфні п'єзоелементи так, щоб вектор електричного поля становив кут з вектором поляризації. Розрахунковим шляхом встановлено величину кута між вектором електричного поля і вектором поляризації для забезпечення максимального рівня звукового тиску. Описано схеми підключення і спосіб збудження згинних коливань у дискових мономорфних п'єзоелементах, які дали змогу збільшити рівень звукового тиску на 20-25 дБ. Встановлено залежність звукового тиску від схеми підключення до генератора, а також експериментально підтверджено, що при підключенні генератора до дискового електрода рівень створюваного звукового тиску буде вищим, ніж при підключенні до кільцевого електрода. Показано, що використання в схемі додаткових індуктивностей дозволяє ще більше підвищити рівень звукового тиску.

Ключові слова: мономорфний перетворювач, просторово-кутова взаємодія, вектор електричного поля, вектор поляризації, рівень звукового тиску.

При проектуванні п'єзокерамічних перетворювачів зазвичай використовують п'єзоелемент певної форми та розмірів з певного п'єзокерамічного матеріалу з певними електрофізичними властивостями (характеристиками).

При цьому традиційно вектор діючої на п'єзоелемент сили F (тиску тощо) паралельний вектору поляризації P .

Одночасно вектор сили F паралельний вектору електричного поля E вихідного сигналу датчика, тобто перпендикулярний електродам, які нанесені на поверхню п'єзоелемента (рис. 1) [1–8].

Очевидно, це пов'язано з тим, що ці електроди під час виготовлення п'єзоелемента використовують для його поляризації. Одночасно вони використовуються також для зняття корисного сигналу при вимірюванні фізичних величин (сили, тиску, прискорення та ін.), а також для введення до п'єзоелемента електричної напруги при його використанні як випромінювача.

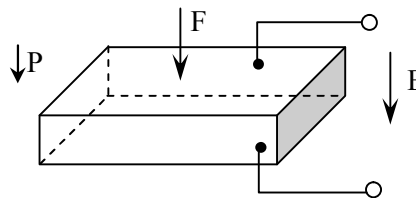


Рис. 1. П'єзоелемент з традиційним розташуванням векторів F , P та E

Такий тип датчика є відомим і має назву традиційного [9]. В цьому випадку для визначеного п'єзоелемента можна отримати лише один перетворювач з певними характеристиками (резонансною частотою, чутливістю, діапазоном робочих частот тощо).

Для отримання датчика з іншими характеристиками раніше було необхідно використовувати інший п'єзоелемент іншого розміру, іншої форми, з іншого п'єзоматеріалу.

В роботах [9–11] було запропоновано при проектуванні п'єзокерамічних перетворювачів враховувати також вектор E електрично-

го поля вихідного сигналу датчика або напру- ги, що подається на випромінювач.

Розташування векторів **F**, **P** та **E** у просторі характеризує просторову енергосилову структуру п'єзоелемента.

Фізика процесів, що відбуваються в цих датчиках, вивчено недостатньо. Висунено гіпотези, що на їх характеристики можуть впливати такі чинники: розсіяння енергії на доменах; зміна електричної ємності між електродами; виникнення в п'єзоелементі інших типів коливань. Визначення можливого внеску кожного з перелічених чинників вимагає подальшого вивчення. Недостатньо вивчені й переваги доменно-дисипативних п'єзоелементів у датчиках. Метод вимагає розвитку і вивчення для використання у випромінювачах звуку.

Метою статті є розширення можливостей проектування п'єзокерамічних перетворювачів шляхом розробки мономорфних перетворювачів з урахуванням просторово-кутової взаємодії векторів електричного поля та поляризації для забезпечення максимального рівня звукового тиску у п'єзокерамічних акустичних випромінювачах.

Для експериментальних досліджень було використано п'єзоперетворювач, виготовлений з п'єзокераміки ЦТС-19 у вигляді циліндра із зовнішнім діаметром 32 мм, внутрішнім діаметром 28 мм і заввишки 20 мм. П'єзоелемент був поляризований радіально. Внутрішній і зовнішній електроди п'єзоелемента були розділені на шість рівних частин. Конструкція циліндричного п'єзоперетворювача показана на рис. 2.

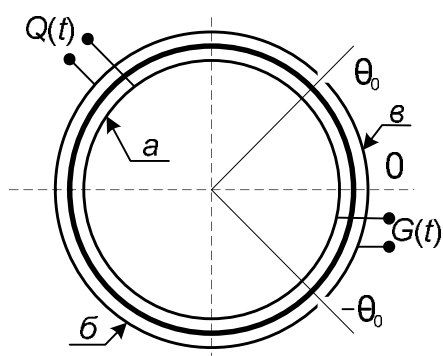


Рис. 2. Розташування електродів на циліндричному п'єзокерамічному перетворювачі (вид зверху):

а – внутрішній електрод заземлення;

б – електрод збудження;

в – генераторний електрод

Аналіз існуючих публікацій з цієї тематики показує, що математичні моделі розроблені в основному для п'єзоперетворювачів у вигляді стрижня, пластини прямокутної або круглої форми [12], або перетворювачів, виконаних у вигляді п'єзокерамічних циліндрів з секційними електродами [13]. Для перетворювачів запропонованої конструкції математичні моделі відсутні.

Математична постановка задач

Початкові рівняння включають:

- рівняння руху п'єзокерамічної циліндричної радіально поляризованої оболонки (плоский випадок) [12]

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{h^2}{12 R^2} \left(1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \right] \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \\ & + \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{h^2}{12 R^2} \left(1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} - \\ & - \frac{e_{13} R}{C_{11}^E} \frac{\partial E_r^{(0)}}{\partial \theta} = \frac{R^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ & - \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{h^2}{12 R^2} \left(1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^3} - \\ & - w - \frac{h^2}{12 R^2} \left(1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^s} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} + \\ & + \frac{e_{13} R}{C_{11}^E} E_r^{(0)} = \frac{R^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{aligned} \quad (1)$$

- вираз індукції D_r для циліндричної оболонки, записаний з використанням співвідношень Коші [12]

$$D_r = e_{13} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) + \epsilon_{33}^s E_r^{(0)}, \quad (2)$$

де h – товщина оболонки;

R – радіус серединної поверхні оболонки;

e_{13} , C_{11}^E , ϵ_{33}^s , γ – п'єзомодуль, модуль пружності, діелектрична проникність і щільність п'єзокераміки, відповідно;

w , u – нормальна і тангенціальна складові переміщень серединної поверхні оболонки;

θ – кутова координата; $E_r^{(0)}$,

D_r – радіальні компоненти напруженості серединної поверхні оболонки та індукції електричного поля (у подальшому індекси « r » і « (0) » опускаємо);

t – час.

Запишемо початкові рівняння (1), (2) в безрозмірному вигляді, розділивши w , u , R , h на R ; t на $\frac{R}{c_k}$; E на $\frac{1}{d_{33}}$; D на e_{13} , тоді будемо мати:

$$(1 + \delta) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial w}{\partial \theta} - \delta \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} - \nu \frac{\partial E}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} - \delta \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^3} + w + \delta \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} - \nu E = -\frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

$$D = \frac{\partial U}{\partial \theta} + w + \frac{1}{\varepsilon} E, \quad (4)$$

де c_k – швидкість звуку в п'єзокераміці;
 d_{33} – п'єзомодуль.

Постійні коефіцієнти, що входять у рівняння (2) і (3), визначаються за формулами:

$$\delta = \frac{h^2}{12R^2} \left(1 + \frac{e_{13}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^s} \right);$$

$$\nu = \frac{e_{13}}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^s}; \quad \varepsilon = \frac{e_{13} d_{33}}{\varepsilon_{33}^s}. \quad (5)$$

На зовнішню і внутрішню поверхні оболонки нанесені металізовані електроди. Внутрішній електрод суцільний і заземлений, а зовнішній – розділений в осьовому напрямку розрізами на дві електрично не зв'язані частини. Шириною розрізів і товщиною електродних покриттів надалі будемо нехтувати.

На секцію електродів збудження, що займають область $[\theta_0; -\theta_0]$, $(\pm \theta_0$ – кутові координати розрізів електрода), підводиться задана електрична напруга $Q(t)$ (рис. 2).

Електричний сигнал, що підводиться, порушує в цій частині перетворювача електричне поле з напруженістю на серединній поверхні [12]

$$E(t) = \frac{Q(t)}{h}. \quad (6)$$

У свою чергу, вважатимемо, що незадіяний електрод $[\theta_0; -\theta_0]$ підключений до електронного пристрою з нескінченно великим (декілька десятків мегом) вхідним опором (режим «холостого ходу»). Тоді для цієї області перетворювача, коли $|\theta| < \theta_0$, виконується умова щодо електричного поля для розіркнених електродів, що забезпечує рівність нулю струму зсуву через ці поверхні циліндричної оболонки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S D ds = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \int_0^L D d\theta dz = 0, \quad (7)$$

де S – поверхня оболонки;

L – безрозмірна висота циліндричної оболонки, що віднесена до R .

Слід зазначити, що вирази (6–7) є електричними граничними умовами на генераторному електроді, а напруга, що задається, Q – електричною граничною умовою на електроді збудження [12].

Вирішення задачі

Розглядатимемо сталий у часі динамічний процес, тобто залежність від часу необхідних фізичних величин, що задається у вигляді $e^{i\omega t}$.

Представимо невідомі переміщення w , u і електричну напруженість E у вигляді рядів, розклавши їх за власними формами коливань оболонки (ряди Фур'є):

$$w(\theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos n\theta e^{i\omega t};$$

$$u(\theta, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin n\theta e^{i\omega t}; \quad (8)$$

$$E(\theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \cos n\theta e^{i\omega t},$$

де w_n , u_n , E_n – невідомі коефіцієнти, що підлягають знаходженню.

Підставивши вибрані вирази (8), із заміною в них індексу підсумовування n на m , в електричні граничні умови (7), отримаємо

$$\sum_{m=1}^{\infty} 2u_m \sin m\theta_0 + \sum_{m=0}^{\infty} 2 \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 + \frac{2\theta_0}{\varepsilon} E = 0. \quad (9)$$

Запишемо другий доданок виразу (9) у вигляді

$$\sum_{m=0}^{\infty} 2 \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 = 2w_0\theta_0 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0.$$

Тоді вираз (9) набуде вигляду

$$2 \sum_{m=1}^{\infty} u_m \sin m\theta_0 + 2w_0\theta_0 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{w_m}{m} \sin m\theta_0 + \frac{2\theta_0}{\varepsilon} E = 0.$$

Вирішимо цей вираз відносно E :

$$E = \varepsilon \left[w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + mu_m) \right]. \quad (10)$$

Електричну напруженість (10) для цієї частини перетворювача (генератора) можна записати у вигляді

$$E = -\varepsilon \left[w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + mu_m) \right] H(\theta_0 - |\theta|), \quad (11)$$

де $H(\theta_0 - |\theta|)$ – функція Хевісайда, яка набуває значення одиниці для області, де електроди розімкнені $(-\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0)$, і нульових значень для частини оболонки, що залишилася.

Електричну напруженість поля для тієї частини перетворювача (збудника), до якої підводиться електрична напруга $Q(t)$, із залученням функції Хевісайда представимо у вигляді

$$E(t) = -\frac{Q(t)}{h} H(|\theta| - \theta_0). \quad (12)$$

Тоді напруженість електричного поля в довільній точці серединної поверхні перетворювача з урахуванням виразів (10), (11) можна записати таким чином:

$$E = -\varepsilon \left[w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + mu_m) \right] \times \\ \times H(\theta_0 - |\theta|) - \frac{Q(t)}{h} H(|\theta| - \theta_0). \quad (13)$$

Розкладаючи вираз (12) по парних функціях в ряд Фур'є з урахуванням виразу (7), отримаємо:

$$E_n = -\varepsilon \eta_n \left[w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + mu_m) \right] - \xi_n \frac{Q}{h} \quad (14)$$

де постійні коефіцієнти, що входять в рівняння (14), визначаються виразами:

$$\eta_0 = \frac{\theta_0}{\pi}, \quad (n=0); \\ \eta_n = \frac{2 \sin n\theta_0}{n\pi}, \quad (n>0); \\ \xi_0 = 1 - \frac{\theta_0}{\pi}, \quad (n=0); \\ \xi_n = -\frac{2 \sin n\theta_0}{n\pi}, \quad (n>0);$$

Запишемо вираз (14) в дещо іншому вигляді:

$$E_n = -\eta_n \sum_{m=0}^{\infty} \lambda_m (w_m + mu_m) - \xi_n \frac{Q}{h} \quad (n=0,1,2,...), \quad (15)$$

де $\lambda_0 = \varepsilon$ при $m=0$; $\lambda_m = \varepsilon \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0}$ при $m=1,2,...$.

Підставляючи вираз (7) у рівняння руху оболонки (8), матимемо:

$$\begin{cases} (1+\delta)n^2 u_n + nw_n + \delta n^3 w_n - v n E_n = \omega^2 u_n; \\ nu_n + \delta n^3 u_n + w_n + \delta n^4 w_n - v E_n = \omega^2 w_n. \end{cases} \quad (16)$$

Помноживши друге рівняння системи (16) на n і віднявши з нього перше, отримаємо:

$$n [d n^2 (n^2 - 1) - w^2] w_n + \\ + [d n^2 (n^2 - 1) + w^2] u_n = 0$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно u_n , будемо мати

$$u_n = \frac{n(\omega^2 - \chi_{n3})}{\omega^2 - \chi_{n3}} w_n, \quad (17)$$

де $\chi_{n3} = \delta n^2 (n^2 - 1)$.

Підставляючи вираз (17) у перше рівняння системи (16), з урахуванням виразу для складових напруженості E_n (15), отримаємо:

$$\frac{w^4 c_{n2} w^2 + c_{n4}}{w^2 + c_{n3}} w_n - \\ - n h_n \sum_{m=0}^{\infty} l_m \frac{c_{m1} w^2 - c_{m4}}{w^2 + c_{m3}} w_m = n x_n \frac{Q}{h},$$

де $\chi_{n1} = (1 + n^2)$;

$\chi_{n2} = (1 + \delta n^2) \chi_{n1}$; $\chi_{n4} = (n^2 - 1) \chi_{n3}$.

Позначивши

$$\Omega_n(\omega) = \frac{\omega^4 - \chi_{n2} \omega^2 + \chi_{n4}}{\omega^2 + \chi_{n3}}; \\ \Psi_m(\omega) = \frac{\chi_{m1} \omega^2 - \chi_{m4}}{\omega^2 + \chi_{m3}},$$

вираз для відшукування W_n можна записати у вигляді

$$\Omega_n(\omega) w_n - v \eta_n \sum_{m=0}^{\infty} \lambda_m \Psi_m(\omega) w_m = v \xi_n \frac{Q}{h}, \\ (n=0,1,2,...). \quad (18)$$

Далі, за обчисленими значеннями w_n , u_n знаходиться амплітуда електричної напруги $G(t)$ на розімкнених електродах п'єзоперетворювача. Для цього необхідно скористатися правою частиною виразу (10):

$$G(t) = \varepsilon h \left[w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} (w_m + mu_m) \right]. \quad (19)$$

Знаходженням амплітуди напруги $G(t)$ на генераторних електродах п'єзоелектричного циліндрового трансформатора закінчується рішення поставленої задачі.

Для дослідження поліелектродного циліндрового п'єзоперетворювача (рис. 3) використовувалася традиційна схема підключення (рис. 4). П'єзокерамічний перетворювач містить два генератори електричних коливань $G1$ і $G2$ і циліндричний поліелектродний п'єзоелемент.

При проведенні експериментальних досліджень використовувався генератор ГЗ-106. Осцилограми вихідного сигналу фіксувалися на осцилографі С1-55. Вимірювання проводилися при дії на перетворювач синусоїдальної електричної напруги ($U = 3$ В).

Результати вимірювань наведені в табл. 1 та на рис. 5.

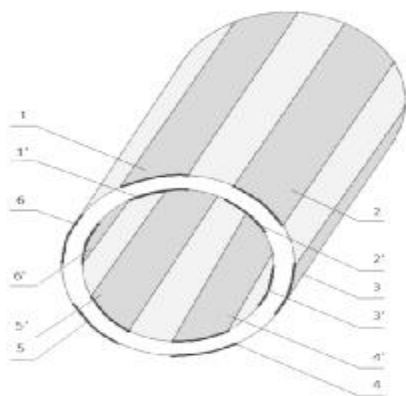


Рис. 3. Конструкція поліелектродного циліндричного п'єзоперетворювача:

1 – 6 – зовнішні електроди;
1' – 6' – внутрішні електроди

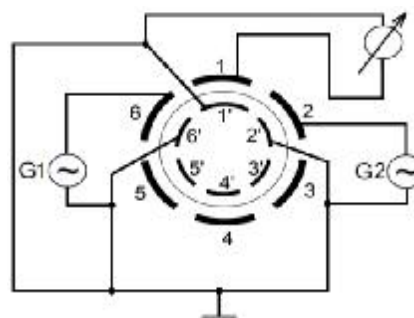


Рис. 4. Традиційна схема підключення циліндричного п'єзоперетворювача

Фотографування проводилося цифровою камерою «Nokia-N8».

З табл. 1 випливає, що найбільший коефіцієнт передачі напруги п'єзоперетворювача можна отримати при його підключенні за схемою № 1.

Досліджувався також вплив площі електродів, на які подається вхідна напруга, на коефіцієнт передачі п'єзоперетворювача в дорезонансній, резонансній і післярезонансній частотних областях. Для вимірювань використовувалася традиційна схема підключення.

Результати вимірювань зображені на осцилограмах рис. 6, а також у табл. 2, з якої видно, що збільшення площі вхідних електродів приводить до збільшення коефіцієнта передачі напруги п'єзоперетворювача. Отримані результати дозволяють припустити, що використання розроблених схем підключення на основі циліндричного поліелектродного п'єзоперетворювача сприяє збільшенню рівня вихідної напруги, і, в свою чергу, акустичної потужності, в чотири рази.

Таблиця 1

Коефіцієнт передачі напруги циліндричного п'єзоперетворювача

Схема №	Система підключення електродів			$K_{пер.}$		
	$G1$	$G2$	Вихід	$f_{др}$	f_p	$f_{пр}$
1	2-2'	6-6'	1-1'	0,13	12,4	1,1
2	2-2'	5-5'	1-1'	0,11	7	0,78
3	4-4'	6-6'	1-1'	0,07	7	1,85
4	5-5'	6-6'	1-1'	0,08	7,2	0,67

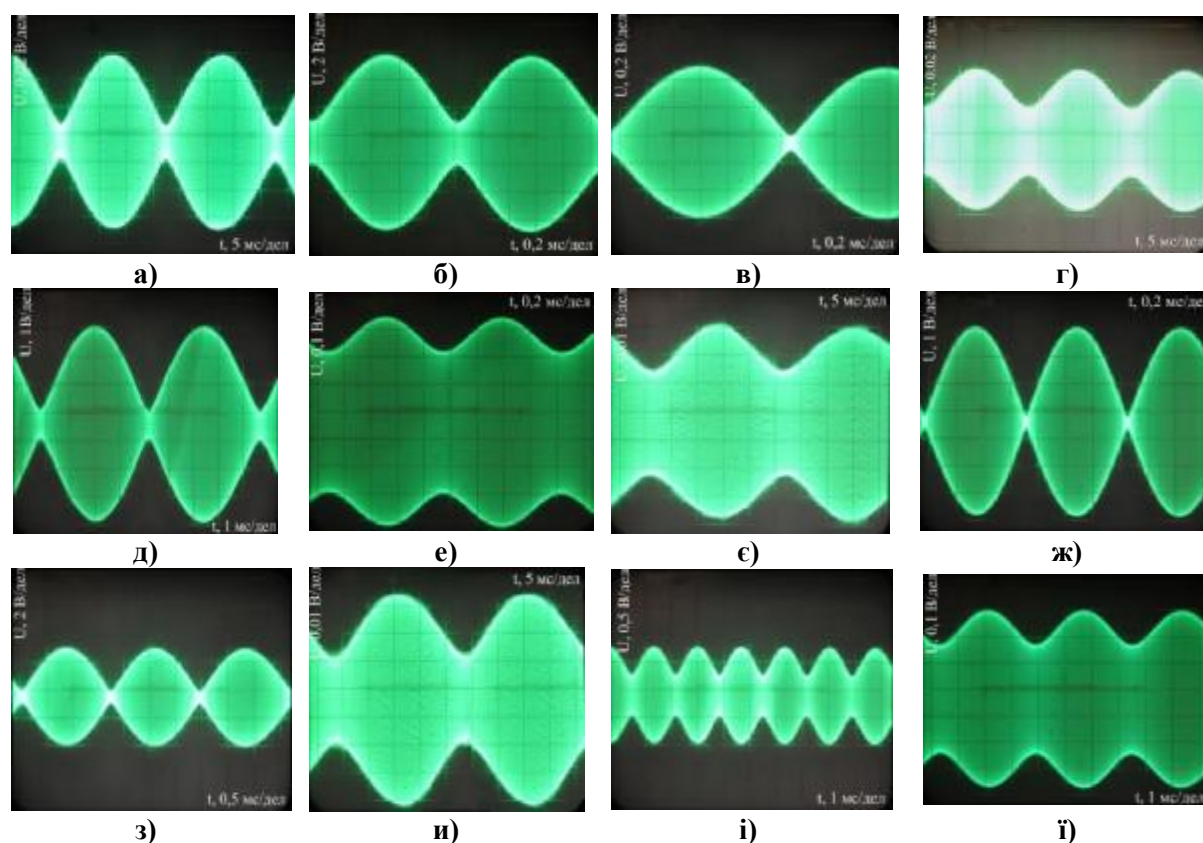


Рис. 5. Осцилограми циліндричного п'єзоперетворювача:
схема 1 – (а, б, в); схема 2 – (г, д, е); схема 3 – (є, ж, з); схема 4 – (и, і, ї)

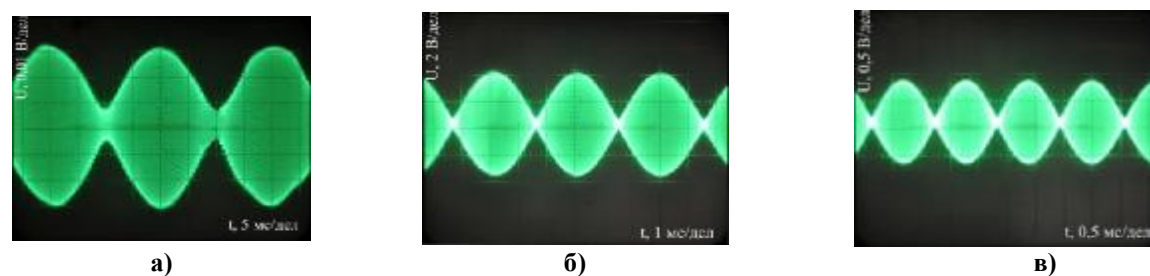


Рис. 6. Осцилограми циліндричного п'єзоперетворювача при збільшенні площі електродів:
а) дорезонансна частота; б) резонансна частота; в) післярезонансна частота

Таблиця 2

Коефіцієнт передачі циліндричного п'єзоперетворювача
при збільшених площах електродів

Електроди			$K_{пер}$		
$G1$	$G2$	Вихід	$f_{ор}$	f_p	$f_{пр}$
2+3-2'+3'	4+5-4'+5'	1+6-1'+6'	0,063	8	1,5

Для опису ПЕСС п'єзоелементів випромінювачів достатньо використовувати два вектори: поляризації P і електричного поля E напруги збудження.

Коли ці вектори паралельні (тобто кут α між ними дорівнює нулю), маємо відомий, традиційний випадок, що широко використовується у випромінюючих електроакустичних

перетворювачах в електро- і гідроакустиці. Характеристики таких перетворювачів детально вивчені.

Несподіваний результат був отриманий для п'єзоелементів випромінюючих перетворювачів при куті $\alpha \approx 90^\circ$ між вектором поляризації і вектором збуджуючого електричного поля при пошуку можливостей створення згинальних коливань у дискових мономорфних п'єзоелементах.

Традиційно вважалося, що в мономорфних п'єзоелементах у вигляді пластин, брусків, дисків згинальні коливання не виникають [14].

Тим часом, експериментально було виявлено виникнення низькочастотних коливань у мономорфних п'єзоелементах, проте рівень звукового тиску, що створювався цими п'єзоперетворювачами, був відносно невеликий [14, 15].

У [16] було показано, що за певної схеми підключення амплітудно-частотна характеристика мономорфних п'єзоелементів у низькочастотній області має резонансний характер. Для уточнення типу цих коливань були отримані фігури Хладні. А для збільшення рівня згинальних коливань було запропоновано створити в п'єзоелементі електричне поле, що стимулювало б ці коливання, для чого електроди на п'єзоелементі розташували так, щоб вектор електричного поля E збуджуючої напруги становив кут α з вектором поляризації P , причому $0 < \alpha \leq 90^\circ$ та використовувалися додаткові електричні елементи.

В результаті проведених додаткових досліджень було математично розраховано та експериментально підтверджено, що найкращий результат можна отримати, якщо забезпечити між векторами поляризації та електричного поля збуджуючої напруги кут у 87° . В цьому випадку вдалося підвищити рівень звукового тиску на 20-25 дБ. Подальшого покращення цих результатів вдалося досягти шляхом використання додаткових індуктивностей.

Отримані результати показали, що рівень звукового тиску на частоті 4,05 кГц для перетворювачів з додатковою індуктивністю

зріс приблизно на 24 дБ порівняно з перетворювачами без індуктивності та приблизно на 36 дБ порівняно з відомою схемою підключення (без урахування кута між векторами електричного поля та поляризації) на цій же частоті.

В подальших дослідженнях було перевірено експериментально, чи поширюються ці результати на п'єзоелементи з іншого п'єзоматеріалу та інших розмірів.

В цьому випадку використовувався дисковий п'єзоелемент (рис. 7) $\varnothing 50 \times 1,2$ мм з п'єзокераміки ЦТБС – 3, яка найчастіше використовується в електроакустиці [1, 6, 16, 17].

Як і у попередньому випадку, електроди на п'єзоелементі розділено на кільця (1, 1') і диски (2-2') (рис. 7). Діаметр дискового електрода – 24 мм, проміжок між електродами – 3 мм.

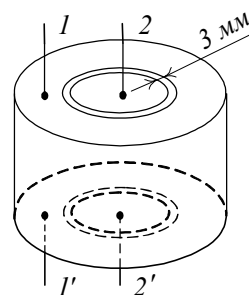


Рис. 7. Дисковий п'єзоелемент з ЦТБС – 3

Метою експериментів було визначення рівня звукового тиску залежно від схеми підключення до генератора. Одночасно вимірювалася ємність між відповідними електродами $C\Sigma$ і опір r_0 на резонансній частоті 3,07 кГц (внутрішнє тертя).

Спочатку були проведені вимірювання для схем без додаткової індуктивності (додаткового коливального контуру), номери схем – з 1 по 5 в табл. 3.

Були також проведені вимірювання для схем з додатковою індуктивністю (однією або двома). Результати вимірювань наведені в табл. 4.

Таблиця 3

Результати вимірювань для схем без додаткової індуктивності

№	Схема	$C\Sigma$, нФ	r_0 , кОм	$P_{зб}$, дБ	№	Схема	$C\Sigma$, нФ	r_0 , кОм	$P_{зб}$, дБ
1		$C1-1' = 22,5$	$r_0 = 2,444$	70	4		$C1-2' = 0,76$	$r_0 = 27,5$	88
2		$C2-2' = 7,1$	$r_0 = 7,311$	77	5		$C2-1' = 0,74$	$r_0 = 24,444$	88
3		$C\Sigma = 30,6$	$r_0 = 1,811$	72					

Таблиця 4

Результати вимірювань для схем з додатковою індуктивністю

№	Схема	$C\Sigma$, нФ	L , Гн	r_0 , кОм	$P_{зб}$, дБ	№	Схема	$C\Sigma$, нФ	L , Гн	r_0 , кОм	$P_{зб}$, дБ
1		$C1-1' = 10,5$	$L1 = 0,15$	-	83	5		$C2-1' = 0,74$	$L1 = 3,41$	$r_0 = 2,839$	108
2		$C2-2' = 4,2$	$L1 = 0,35$	-	93	6		$C1-1' = 22,5$ $C2-2' = 7,1$	$L2 = 0,352$ $L1 = 0,111$	$r_0 = 0,2$	109
3		$C\Sigma = 15,2$	$L1 = 0,11$	$r_0 = 0,22$	92	7		$C1-2' = 0,76$ $C2-2' = 7,1$	$L2 = 0,56$ $L1 = 3,50$	$r_0 = 0,463$	111
4		$C1-2' = 0,76$	$L1 = 3,34$	$r_0 = 2,75$	108	8		$C1-1' = 22,5$ $C2-1' = 0,74$	$L2 = 3,41$ $L1 = 0,141$	$r_0 = 0,244$	114

За результатами математичних розрахунків та експериментальних досліджень було зроблено такі **висновки**:

1. При підключенні генератора до дискового електрода рівень створюваного звукового тиску був вищим, ніж при підключенні до кільця.

2. При підключенні дискового і кільцевого електродів паралельно рівень звукового тиску практично не зростає, хоча сумарна ємність між електродами $C\Sigma$ зросла, а опір r_0 зменшився.

3. При підключенні генератора до електродів п'єзoeлемента так, щоб кут α між електричним полем і вектором поляризації наближався до 90° , звуковий тиск зріс, незважаючи на те, що ємність зменшилася, а r_0 збільшилося.

4. При використанні додаткових індуктивностей, аналогічно випадку без додаткової індуктивності, звуковий тиск був вищим при підключенні генератора до дискового електрода.

5. При використанні додаткових індуктивностей для схем з кутом $\alpha \approx 90^\circ$ звуковий тиск був на 15-25 дБ вищим, ніж для схем з традиційним підключенням.

6. Перетворювач за традиційною схемою з однією індуктивністю створює менший звуковий тиск, ніж перетворювач за традиційною схемою з двома індуктивностями.

7. Максимальний звуковий тиск можна отримати для схеми, в якій електрична напруга підводиться за традиційною схемою ($\alpha=0^\circ$) до кільцевого електрода, а під кутом $\alpha \approx 90^\circ$ – до дискового.

Список літератури

1. Джагунов Р. Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления / Р. Г. Джагунов, А. А. Ерофеев. – С.Пб.: Политехника, 1994. – 608 с.
2. Домаркас В. И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В. И. Домаркас, Р.-Й. Ю. Кажис. – Вильнюс: Лиентис, 1975. – 258 с.
3. Евтютов А. П. Инженерные расчеты в гидроакустике / А. П. Евтютов, В. Б. Митько. – Л.: Судостроение, 1988. – 234 с.
4. Справочник по гидроакустике / [Евтютов А. П., Колесников А. Е., Корепин Е. А. и др.] – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
5. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. Голяминой И. П. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.
6. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Sharapov V. Piezoceramic sensors. – Springer Verlag, 2011. – 498 p.
8. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / [В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула и др.] / под ред. В. М. Шарапова. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 278 с.
9. Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement / [V. Sharapov, A. Vladisauskas, K. Bazilo et al.] // Ultragarsas (Ultrasound). – Kaunas: Technologija, 2009. – Vol. 64, № 4. – P. 44–50.
10. The new technologies of piezoceramic sensors synthesis / V. Sharapov, A. Vladisauskas, P. A. Molchanov, Zh. V. Sotula // Ultragarsas (Ultrasound). – Kaunas: Technologija, 2011. – Vol. 66, № 3. – P. 23–27.
11. Об эффекте возникновения изгибных колебаний в мономорфных пьезоментах / [В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула и др.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 3. – С. 60–62.
12. Шульга Н. А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев; отв. ред. Б. П. Маслов; АН УССР. Ин-т механики. – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
13. Шарапов В. М. Математическое моделирование работы цилиндрического пьезокерамического трансформатора с двумя секциями генераторных электродов / В. М. Шарапов, В. Г. Савин, И. О. Моргун // Электроника и связь. – К.: НТУУ «КПИ», 2010. – № 6.
14. Шарапов В. М. Вынужденные колебания цилиндрического пьезопреобразователя при неоднородном электрическом возбуждении / В. М. Шарапов, В. Г. Савин, И. О. Моргун // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 71–77.
15. К вопросу о создании низкочастотных акустических колебаний с помощью пьезоэлектрических преобразователей / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, П. А. Молчанов, В. Г. Савин // Вісник Чер-

- каського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 78–81.
16. Bondarenko Yu. Yu. The increase of sound pressure level of monomorph transducers with use of spatial energy force structure of a piezoelement / Yu. Yu. Bondarenko, K. V. Bazilo, L. G. Kunytska // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 3. – С. 5–9.
 17. Методы синтеза пьезоэлектрических преобразователей: метод добавочных элементов. Индуктивность / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, П. А. Молчанов, В. Г. Савин // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 82–85.
- ### References
1. Dzhahupov, R. H. and Yerofeev, A. A. (1994), Piezoelectronic devices of computer engineering, control and management systems. St. Petersburg: Politekhnik, 608 p. [in Russian].
 2. Domarkas, V. I. and Kazhys, R.-Y. Yu. (1975), Gauging piezoelectric transducers. Vilnius: Liyentis, 258 p. [in Russian].
 3. Evtuytov, A. P. and Myt'ko, V. B. (1988), Engineering calculations in underwater acoustics. L.: Sudostroeniye, 234 p. [in Russian].
 4. Evtuytov, A. P., Kolesnikov, A. E., Korepin, E. A et al. (1988), Hydroacoustics reference. L.: Sudostroeniye, 552 p. [in Russian].
 5. Ultrasound. Little encyclopedia (1979). Golyamina I. P. (ed.). Moscow: Sov. entsyklopediya, 400 p. [in Russian].
 6. Sharapov, V. M., Musiyenko, M. P. and Sharapova, E. V. (2006), Piezoelectric sensors. Moscow: Tekhnosfera, 632 p. [in Russian].
 7. Sharapov V. Piezoceramic sensors. – Springer Verlag, 2011. – 498 p.
 8. Sharapov, V. M., Minayev, I. G., Sotula, Zh. V. et al. (2010), Piezoceramic transformers and sensors. V. M. Sharapov (ed.). Cherkassy: Vertikal', 278 p. [in Russian].
 9. Sharapov, V., Vladisauskas, A., Bazilo, K. et al. (2009), Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. *Ultragarsas* (Ultrasound). Kaunas: Technologija, 64 (4), pp. 44–50.
 10. Sharapov, V., Vladisauskas, A., Molchanov, P. A. and Sotula, Zh. V. (2011), The new technologies of piezoceramic sensors synthesis. *Ultragarsas* (Ultrasound). Kaunas: Technologija, 66 (3), pp. 23–27.
 11. Sharapov, V. M., Minayev, I. G., Sotula, Zh. V. et al. (2011), On the effect of occurrence of flexural vibrations in monomorphic piezoelements. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (3). Cherkassy: ChDTU, pp. 60–62 [in Russian].
 12. Shul'ga, N. A. and Bolkisev, A. M. (1990), Fluctuations of piezoelectric bodies. B. P. Maslov (ed.). Kiev: Nauk. dumka, 228 p. [in Russian].
 13. Sharapov, V. M., Savin, V. G. and Morgun, I. O. (2010), Mathematical modeling of cylindrical piezoceramic transformer with two sections of generating electrodes. *Elektronika i svyaz'*. Kiev: NTUU «KPI», (6) [in Russian].
 14. Sharapov, V. M., Savin, V. G. and Morgun, I. O. (2011), Forced vibrations of a cylindrical piezoelectric transducer with inhomogeneous electric excitation. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (1), pp. 71–77 [in Russian].
 15. Sharapov, V. M., Sotula, Zh. V., Molchanov, P. A. and Savin V. G. (2011) On the issue of creating low-frequency acoustic vibrations using piezoelectric transducers. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (1), pp. 78–81 [in Russian].
 16. Bondarenko, Yu. Yu., Bazilo, K. V. and Kunytska, L. G. (2015), Increase of level sound pressure of monomorph transducers with use of spatial energy force structure of piezoelement. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (1), pp. 5–9.
 17. Sharapov, V. M., Sotula, Zh. V., Molchanov, P. A. and Savin, V. G. (2011), Methods of synthesis of piezoelectric transducers: the method of additive elements. Inductance *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (1), pp. 82–85 [in Russian].

Iu. Iu. Bondarenko, *Ph.D., associate professor,*

C. V. Bazilo, *Ph.D., associate professor,*

V. M. Zaika, *assistant*

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
kafedra-kitp@rambler.ru

DEVELOPMENT OF MONOMORPHIC CONVERTERS USING SPATIAL AND ANGULAR INTERACTION OF ELECTRIC FIELD VECTOR AND POLARIZATION VECTOR

The article is devoted to further improvement of monomorphic piezoelectric transducers with the aim of increasing sound pressure level. The vector of force, acting on piezoelectric element, is traditionally parallel to polarization vector. To obtain sensors with the desired characteristics in the design of piezoelectric transducers it is proposed to connect monomorphic piezoelectric elements so that electric field vector would made an angle with polarization vector. The magnitude of the angle between electric field vector and polarization vector for providing maximum level of sound pressure is determined by the calculation. Connection circuits and the mode of flexural vibrations excitation in disk monomorphic piezoelements, which allowed to increase sound pressure level by 20-25 dB, are described. The dependence of sound pressure on the circuit connections to the generator is determined. It is established and experimentally confirmed that sound pressure level will be higher when connecting the generator to a disk electrode, than when connecting it to a ring electrode. It is shown that the use of additional inductance in the circuit can further increase sound pressure level.

Keywords: *monomorphic converter, spatial and angular interaction, electric field vector, polarization vector, sound pressure level.*

Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н., професор,

В. Я. Гальченко, д.т.н., професор

ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 539.18(075.8)

С. О. Колінько¹, к.ф.-м.н., доцент,

Т. І. Бутенко¹, к.т.н., доцент

Л. О. Кулик², к.п.н., доцент

¹Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18000, Україна

²Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького

б-р Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ФАХОВО СПРЯМОВАНИХ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ЗАГАЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ

Розглянуто проблемні питання, пов'язані з оцінюванням знань студентів при вивченні загального курсу фізики. Проаналізовано доцільність використання тестової форми контролю поточної успішності студентів. Представлено методику модульного контролю, яка базується на застосуванні тестової технології.

Ключові слова: тест, технологія, оцінювання знань та навичок, модульний контроль, якість знань.

Постановка проблеми. Вхідження України в європейський освітній простір вимагає модернізації вітчизняної освіти з метою приведення викладання навчальних дисциплін і оцінювання знань та умінь студентів до норм, які існують у більшості європейських університетів, що сприятиме конкурентоспроможності та мобільності українських студентів.

Одним із сучасних методів контролю навчальних досягнень студентів, який враховує зазначені вище вимоги, є тестове оцінювання, завдяки якому викладач якісно і досить швидко визначає рівень теоретичних знань студентів, їх практичні уміння і навички.

Особливістю такої форми контролю є об'єктивність, малі затрати часу та самостійність студентів. Дидактичне забезпечення процесу оцінювання знань студентів загалом та під час вивчення фізики зокрема є напрямом роботи, що постійно потребує розвитку і удосконалення.

Тому, виникає необхідність розробки тестових завдань на основі вивчення теоретичних засад формування і використання різномірних тестових завдань для поточної та підсумкової перевірки знань і умінь студентів.

Аналіз дослідження. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що проблема організації та впровадження тестової перевірки знань і умінь студентів є актуаль-

ною на сучасному етапі розвитку вищої освіти України. Тестова форма контролю знань студентів відносно недавно використовується у вищій школі і наразі перебуває під постійною та прискіпливою увагою науковців. Зокрема, коло питань, що торкаються цієї проблеми, висвітлюються у працях М. І. Шута, М. Б. Челишкової, В. А. Садовниченко, А. І. Кузьмінського, П. С. Атаманчука, О. І. Богатирьова та ін. [2–5].

Оскільки вдосконалення форм і методів контролю знань, умінь і навичок студентів, ефективна організація контрольних заходів з використанням тестових технологій суттєво впливають на якість підготовки майбутніх фахівців, то виникає необхідність спрямувати зусилля науковців на розробку дидактичного і методичного забезпечення для впровадження тестового контролю знань студентів різних напрямів підготовки, зокрема із загального курсу фізики.

Мета статті – презентувати методику модульного контролю знань і умінь студентів інженерних спеціальностей під час вивчення ними навчальної дисципліни «Загальна фізика», яка базується на застосуванні тестової технології.

Виклад основного матеріалу. Згідно з вимогами Міністерства освіти і науки України навчальна дисципліна, пропонована студентам для вивчення у ВНЗ, складається з моду-

лів, а кожний модуль – із змістових модулів. Після вивчення окремого змістового модуля доцільно проводити оцінювання знань студентів з метою контролю їх поточної успішності, що є важливим як для викладача, так і для студента. Студент, за результатами контролю, може реально оцінити свій рівень знань і скорегувати свою подальшу навчальну роботу. Викладач отримує інформацію про рівень навчальних досягнень кожного студента, а також аналізує ефективність своїх педагогічних зусиль [6].

В останні роки під час проведення контрольних заходів все ширше використовується тестова форма контролю [7]. З нашої точки зору, тестову форму доцільно використовувати для контролю поточної успішності студентів, а також під час проведення ректорських та комплексних контрольних робіт.

Перевагами тестових технологій є об'єктивність оцінювання, невелика часова затратність на проведення та перевірку робіт, самостійність виконання студентами завдань (за умови достатності кількості різних варіантів).

До недоліків тестових технологій слід віднести складність уникнення формального підходу при оцінюванні знань студентів з фізики. Адже для повноцінного засвоєння навчального матеріалу з фізики недостатньо знати лише формули та формулювання законів. Студент повинен розуміти суть фізичних явищ і процесів, уміти будувати моделі, які дозволяють математично описати ці явища і процеси.

При підготовці контрольних робіт для модульного контролю успішності студентів нами було враховано, що загальна фізика у Черкаському державному технологічному університеті, як правило, обмежується лише двома семестрами, з тенденцією до постійно-

го зменшення кількості годин на її вивчення. Це спричиняє досить високу насиченість кожного модуля інформацією. Тому, нами був обраний шлях – збільшення кількості завдань у роботі, але зменшення їх складності. Це дало змогу охопити практично всі теми, які розглядаються під час вивчення модуля [8–10].

Контрольна робота для кожного модуля має 30 завдань і складається з двох частин. 25 завдань – це тести, що мають чотири варіанти відповідей, із яких лише одна відповідь є правильною. Правильна відповідь на одне завдання оцінюється в три бали. П'ять завдань – це задачі, які студенти розв'язують на додаткових листках, а в бланк відповідей вносять числовий результат і одиниці вимірювання шуканої величини. Розгорнутий розв'язок задачі та правильна відповідь оцінюються в п'ять балів. Отже, максимальна кількість балів, яку може отримати студент за виконану роботу, – 100. На виконання роботи відводиться 80 хвилин.

Курс загальної фізики ми розділили на шість змістових модулів (по три в кожному семестрі):

- 1) механіка;
- 2) молекулярна фізика і термодинаміка;
- 3) електростатика, постійний електричний струм;
- 4) магнітне поле, електромагнітна індукція, змінний струм;
- 5) оптика, теорія відносності, теплове випромінювання;
- 6) атомна фізика, квантова теорія, фізика твердого тіла, ядерна фізика.

Як приклад, наведемо один із варіантів контрольної роботи з використанням тестових завдань для поточного контролю знань і умінь студентів із змістового модуля «Молекулярна фізика і термодинаміка».

Варіант № 1

1. Яка формула описує залежність тиску p молекул повітря від висоти h над поверхнею Землі?

$$1) P = P_0 \frac{\mu g}{RT} h; \quad 2) P = P_0 e^{\frac{\mu g}{RT} h}; \quad 3) P = P_0 e^{-\frac{\mu g}{RT} h}; \quad 4) P = P_0 h.$$

2. У випадку ізобарного процесу ...

$$1) \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad 2) \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad 3) P_1 V_1 = P_2 V_2; \quad 4) P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma.$$

3. Який вираз є рівнянням Майєра?

- 1) $C_p = C_v + R$; 2) $C_p = R$; 3) $C_v = R$; 4) $C_v = \frac{i}{2} R$.

4. Чому дорівнює зміна ентропії ідеального газу при оборотному адіабатному процесі?

- 1) $\Delta S = 1$; 2) $\Delta S = 0$; 3) $\Delta S = 2$; 4) $\Delta S = \infty$.

5. Що є наслідком дії сил притягання між молекулами реального газу?

- 1) збільшення температури газу;
2) зменшення ефективного діаметра молекул газу;
3) поява додаткового тиску;
4) збільшення об'єму молекул.

6. Яке із рівнянь відповідає першому закону термодинаміки для адіабатного процесу?

- 1) $dQ = dU + dA$; 2) $dQ = dA$; 3) $dQ = dU$; 4) $dA = -dU$.

7. Вкажіть рівняння Клапейрона-Менделєєва:

- 1) $P = \frac{1}{3} \rho \langle v_{\text{кв.}} \rangle^2$; 2) $PV = \frac{m}{\mu} RT$; 3) $\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} kT$; 4) $PV^\gamma = \text{const}$.

8. У випадку ізохорного термодинамічного процесу ...

- 1) $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 2) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 3) $P_1 V_1 = P_2 V_2$; 4) $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$.

9. Яке із формулювань відповідає теоремі Карно?

- 1) коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини визначається лише температурами нагрівника і холодильника;
2) коефіцієнт корисної дії теплової машини визначається лише температурою нагрівника;
3) коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини визначається лише температурою холодильника;
4) коефіцієнт корисної дії теплової машини дорівнює різниці температур нагрівника і холодильника.

10. Яке із рівнянь є рівнянням Ван-дер-Ваальса для одного моля реального газу?

- 1) $pV = RT$; 2) $PV = \frac{m}{\mu} RT$; 3) $(p + \frac{a}{V_0^2})(V_0 - b) = RT$; 4) $U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$.

11. Математичний запис закону Бойля-Маріотта має вигляд ...

- 1) $PV_m = RT$; 2) $PV = \text{const}$; 3) $\frac{P}{T} = \text{const}$; 4) $\frac{V}{T} = \text{const}$.

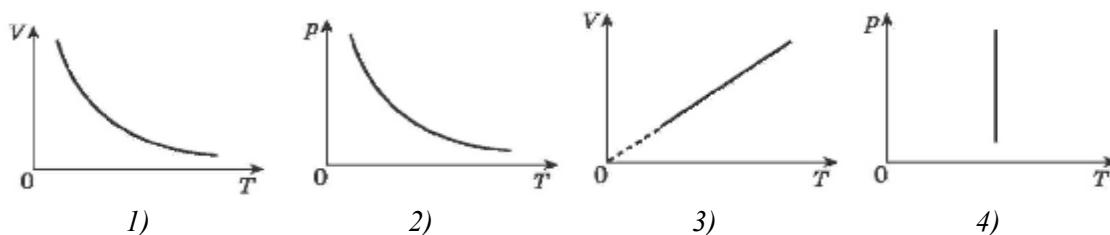
12. Який із виразів описує розподіл Больцмана?

- 1) $P = nkT$; 2) $n = n_0 e^{-\frac{E_n}{kT}}$; 3) $\langle E_0 \rangle = \frac{i}{2} kT$; 4) $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$.

13. У випадку ізотермічного термодинамічного процесу ...

- 1) $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 2) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 3) $P_1 V_1 = P_2 V_2$; 4) $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$.

14. Який із наведених на рисунках графіків описує ізотермічний процес в ідеальному газі?



15. Яке із рівнянь відповідає першому закону термодинаміки для ізохорного процесу?

1) $dQ = dU + dA$; 2) $dQ = dA$; 3) $dQ = dU$; 4) $dA = -dU$.

16. Який вираз відповідає роботі, яку виконує газ при ізохорному процесі?

1) $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$; 2) $A = 0$; 3) $A = P(V_2 - V_1)$; 4) $A = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_1 - T_2)$.

17. Вкажіть формулу, за якою можна визначити середню кінетичну енергію поступального руху молекули одноатомного газу:

1) $\bar{E}_k = kT$; 2) $\bar{E}_k = \frac{2}{3} kT$; 3) $\bar{E}_k = \frac{1}{3} kT$; 4) $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$.

18. Яке із рівнянь відповідає першому закону термодинаміки для ізотермічного процесу?

1) $dQ = dU + dA$; 2) $dQ = dA$; 3) $dQ = dU$; 4) $dA = -dU$.

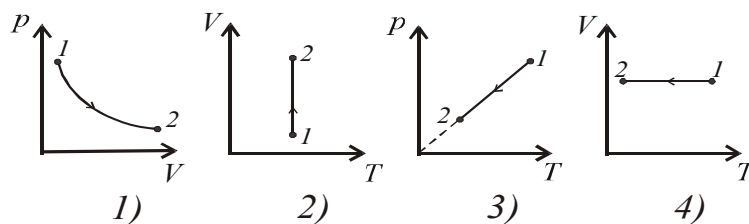
19. Вкажіть вираз для розрахунку внутрішньої енергії ідеального газу:

1) $\frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$; 2) $\frac{3}{2} kT$; 3) $\frac{m}{\mu} N_A$; 4) $\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$.

20. Який вираз відповідає роботі, яку виконує газ при ізобарному розширенні?

1) $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$; 2) $A = 0$; 3) $A = P(V_2 - V_1)$; 4) $A = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_1 - T_2)$.

21. Газ ізохорно переходить зі стану 1 у стан 2. Такий перехід відображено на графіку ...



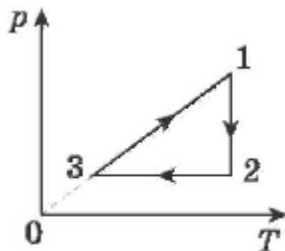
22. Рівняння адіабатного термодинамічного процесу (рівняння Пуассона) має вигляд ...

1) $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 2) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 3) $P_1 V_1 = P_2 V_2$; 4) $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$.

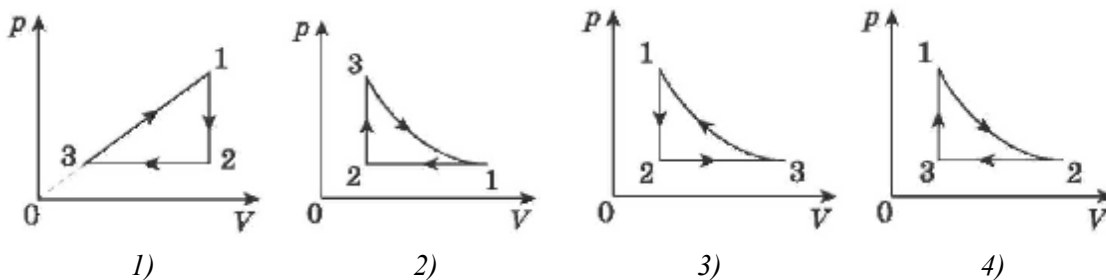
23. Який вираз відповідає роботі, яку виконує газ при ізотермічному розширенні?

1) $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$; 2) $A = 0$; 3) $A = P(V_2 - V_1)$; 4) $A = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_1 - T_2)$.

24. На рисунку наведено графік зміни стану ідеального газу в координатах P, T .



Який із графіків у координатах P, V відповідає цьому процесу?



25. Який вираз відповідає роботі, яку виконує газ при адіабатному розширенні?

$$1) A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad 2) A = 0 \quad 3) A = P(V_2 - V_1) \quad 4) A = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_1 - T_2)$$

26. Визначити густину ρ гелію при тиску $P = 83100 \text{ Па}$ і температурі $T = 200 \text{ К}$. Молярна маса гелію $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; універсальна газова стала $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

27. Для нагрівання деякої маси води від 15°C до 20°C потрібно 1000 Дж теплоти. Щоб нагріти цю саму воду від 40°C до 50°C необхідно _____ Дж теплоти.

28. Визначити внутрішню енергію U одного моля водню H_2 , взятого при температурі $T = 400 \text{ К}$. Універсальна газова стала $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

29. Визначити к.к.д. η теплової машини, яка виконує цикл Карно, якщо температура нагрівника $T_1 = 500 \text{ К}$, а температура холодильника $T_2 = 200 \text{ К}$.

30. Визначити кількість теплоти, яка потрібна, щоб розплавити 2 кг льоду, взятого при температурі -20°C . ($c_{\text{л}} = 2100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\lambda = 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Таким чином, тестова форма реалізації модульного контролю дозволяє ефективно контролювати поточну успішність студентів, аналізувати та коригувати педагогічні зусилля викладача. Родзинкою такого виду контролю є об'єктивність оцінювання, економія часу та самостійність студентів під час виконання контрольних робіт із загального курсу фізики. Подальші дослідження полягають в удосконаленні дидактичного та методичного забезпечення розробленої тестової технології контролю знань і умінь студентів.

Список літератури

1. Кузьмінський А. І. Педагогіка вищої школи : навч. посіб. / А. І. Кузьмінський. – К. : Знання, 2005. – 486 с.
2. Методика здійснення комплексної діагностики знань студентів з курсу загальної фізики : метод. рекомендації / [за ред. М. І. Шута]. – К. : НПУ, 2002. – 14 с.
3. Атаманчук П. С. Управління процесом навчально-пізнавальної діяльності / П. С. Атаманчук. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський держ. пед. ін-т, інформ.-видав. відділ, 1997. – 136 с.

4. Атаманчук П. С. Особливості реалізації еталонних вимог контролю у навчанні / П. С. Атаманчук // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного педагогічного інституту. – Вип. 2. – Кам'янець-Подільський педінститут, 1995. – С. 252–264. – (Серія фізико-математична).
5. Ткаченко А. В. Тестовий контроль знань студентів під час проведення лабораторного практикуму / А. В. Ткаченко, Л. О. Кулик, О. І. Богатирьов // Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. – Вип. 17. – К. : Видав. НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2009. – С. 217–222. – (Серія «Педагогічні науки»).
6. Богатирьов О. І. Тести з загальної фізики як засіб поточного та підсумкового контролю знань студентів / О. І. Богатирьов, Л. О. Кулик, А. В. Ткаченко // Вісник Черкаського університету. – Вип. 93. – Черкаси, 2006. – С. 3–7. – (Серія «Педагогічні науки»).
7. Богатирьов О. І. Тестові завдання з оптики : навч.-метод. посіб. для студентів і викладачів фізичних спец. вищих навч. закл. освіти / О. І. Богатирьов. – Черкаси : Вид. відділ Черкаського нац. ун-ту ім. Богдана Хмельницького, 2011. – 92 с.
8. Колінько С. О. Модульний контроль знань студентів інженерних спеціальностей під час вивчення загального курсу фізики / С. О. Колінько, О. Ю. Кулик, Т. І. Бутенко // Сучасні тенденції навчання фізики у загальноосвітній та вищій школі : зб. наук. праць Міжнар. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження І. В. Попова. – Кіровоград, 25–26.04.2014. – С. 70–72.
9. Кулик Л. О. Експрес-контроль із загального курсу фізики / Л. О. Кулик, О. І. Богатирьов // Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету ім. Павла Тичини. – Умань : ПП Жовтий О. О., 2012. – Ч. 4. – С. 197–203.
2. Shut, M. I. (2002), Methodology of realization of complex diagnostics of students knowledge from the course of general physics. K. : NPU, 14 p. [in Ukrainian].
3. Atamanchuk, P. S. (1997), Process control of educational-cognitive activity. Kam'yanets'-Podil's'kyi: Kam'yanets'-Podil's'kyi derzh. ped. in-t, inform.-vidav. viddil, 136 p. [in Ukrainian].
4. Atamanchuk, P. S. (1995), Features of realization of standard requirements of control in the studies. *Zbirnyk naukovykh prats' Kam'yanets'-Podil's'koho derzhavnoho pedahohichnoho instytutu. Seriya fizyko-matematychna*, (2), Kam'yanets'-Podil's'kyi pedinstytut, pp. 252–264 [in Ukrainian].
5. Tkachenko, A. V., Kulyk, L. O. and Bohatyr'ov, O. I. (2009), Test control of students knowledge during the realization of laboratory practical works. *Naukovyy chasopys natsional'noho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova. Seriya: Pedahohichni nauky*, (17). Kyiv: Vydav. NPU im. M. P. Drahomanova, pp. 217–222 [in Ukrainian].
6. Bohatyr'ov, O. I., Kulyk, L. O. and Tkachenko, A. V. (2006), Tests from general physics as a means of the present and final control of students knowledge. *Visnyk Cherkas'koho universytetu. Seriya: Pedahohichni nauky*, (93), Cherkasy, pp. 3–7 [in Ukrainian].
7. Bohatyr'ov, O. I. (2011), Test tasks from optics. Cherkasy: Vyd. viddil Cherkas'koho nats. un-tu im. Bohdana Khmel'nyts'koho, 92 p. [in Ukrainian].
8. Kolin'ko, S. O., Kulyk, O. Yu. and Butenko, T. I. (2014), Modular control of knowledge of students of engineering specialties during the study of general physics. *Suchasni tendentsiyi navchannya fizyky u zahal'noosvitniy ta vyshchiy shkoli: proceed. of Internat. conf., dedicated to 100th centenary from I. V. Popov birthday*. Kirovohrad, 25–26.04.2014, pp. 70–72 [in Ukrainian].
9. Kulyk, L. O. and Bohatyr'ov, O. I. (2012), Express-control from general physics. *Zbirnyk naukovykh prats' Umans'koho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu im. Pavla Tychny, (4)*. Uman': PP Zhovtyy O. O., pp. 197–203 [in Ukrainian].
1. Kuz'mins'kyj, A. I. (2005), Pedagogics of higher school. Kyiv: Znannya, 486 p. [in Ukrainian].

References

S. O. Kolinko¹, *Ph.D., associate professor,*

T. I. Butenko¹, *Ph.D., associate professor,*

L. O. Kulyk², *Ph.D., associate professor*

¹Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Bohdan Khmelnytsky National University at Cherkasy

Shevchenko blvd, 81, Cherkasy, 18000, Ukraine

THE USE OF PROFESSIONALLY DIRECTED TEST TASKS FOR MODULAR CONTROL OF STUDENTS KNOWLEDGE IN THE STUDY OF GENERAL PHYSICS COURSE

Problematic issues associated with the evaluation of students' knowledge in the study of general physics course are considered. It is found that the test allows to evaluate the level of theoretical knowledge of students and their practical skills qualitatively and quickly. The peculiarity of this form of control consists in the objectivity, a small loss of time and students' independence. Didactic support of students' knowledge evaluation in general, and in the study of physics, in particular, is an area of work that requires constant development and improvement.

The technique of modular control of knowledge and skills of engineering students in the study of "General Physics" discipline is presented. It is based on the application of test technology.

Test form of modular control realization can effectively control the current progress of students, analyze and adjust educational efforts of the teacher. A student, on results control, can really estimate the level of knowledge and correct the further educational work.

Further studies are to improve didactic and methodological support of the developed test control of knowledge and abilities of students.

Keywords: *test, technology, evaluation of knowledge and skills, modular control, quality of knowledge.*

Рецензент В. А. Ващенко, д.т.н., професор

ДО 20-РІЧЧЯ ЗАСНУВАННЯ «ВІСНИКА ЧІТІ – ЧДТУ»

УДК 001.891:908(477.46)

В. І. Кунченко-Харченко, д.т.н., професор,
завідувач кафедри інформатики та інформаційної безпеки,
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна
kunchenco@mail.ru

ТВОРЧИЙ СПАДОК І ДОСЯГНЕННЯ НАУКОВОЇ ШКОЛИ ПРОФЕСОРА, АКАДЕМІКА ЮРІЯ ПЕТРОВИЧА КУНЧЕНКА

*Присвячується пам'яті
професора, академіка
Юрія Петровича Кунченка*



Ю. П. Кунченко у робочому кабінеті



**Із дружиною В. І. Кунченко-Харченко
у Ганноверському інституті зв'язку, Німеччина**

Юрій Петрович Кунченко – доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений працівник науки і техніки України, академік Інженерної академії, Академії зв'язку України та Нью-Йоркської академії наук, почесний професор Черкаського державного технологічного університету.

Ю. П. Кунченко закінчив у 1962 р. радіофізичний факультет Томського державного університету. У 1973 р. захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук у Раді при Томському університеті і дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук в 1988 р. у Раді при Харківському державному університеті. Всі дисертації захищені за фахом «Радіофізика, включаючи квантову радіофізику». Після закінчення університету він тривалий час працював у Сибірському

фізико-технічному інституті при Томському університеті, був першим начальником обчислювального центру Томського державного університету і першим завідувачем науково-дослідної лабораторії обчислювальних систем.

З 1979 р. працював у Кіровоградському інституті сільськогосподарського машинобудування на посадах доцента, професора і завідувача кафедри вищої математики.

22 січня 1990 р. Ю. П. Кунченка запросили до Черкаського філіалу Київського політехнічного інституту. Із його приїздом були створені необхідні й достатні умови для відкриття в ЧФ КПІ кафедри радіотехніки як випускової. Саме професор Кунченко Ю. П. був засновником кафедри радіотехніки, а до її першого викладацького складу увійшли доценти Г. Г. Березуцький, Ю. Г. Катков, Ю. Г. Лега, С. М. Первунінський, О. О. Сучков.

Ю. П. Кунченко є фундатором нового наукового напрямку в галузі нелінійної статистичної обробки негауссівських сигналів. Ним були запропоновані нові методи оцінювання параметрів випадкових процесів, що базувалися на використанні стохастичних поліномів. Юрій Петрович – автор понад 150 наукових праць, у тому числі шести монографій, серед яких – «Нелінійна оцінка параметрів негауссівських радіофізичних сигналів».

Свідченням високої оцінки його досягнень є почесні нагороди: у 1996 р. Міжнародним біографічним центром у Кембриджі він був вибраний Міжнародною людиною року 1995–96 рр., а у 1997 р. – Американським біографічним інститутом – Міжнародною людиною року; у 1998 р. – занесений у книгу «2000 видатних людей XX століття» із врученням медалі.

У 2000 р. він був обраний почесним громадянином м. Черкаси і нагороджений пам'ятним знаком «За заслуги перед містом Черкаси» III ступеня.

20 січня 2006 р. Указом Президента України йому присвоєно почесне звання «Заслужений працівник науки і техніки».

На честь Юрія Петровича Кунченка був заснований фонд «Наукова школа ім. Юрія Петровича Кунченка». Очолила фонд і є його президентом професор Валентина Іванівна Кунченко-Харченко, кандидат історичних на-

ук, доктор технічних наук, завідувач кафедри інформатики та інформаційної безпеки.

Подальший розвиток наукового напрямку, заснованого Юрієм Петровичем Кунченком, забезпечується наполегливою працею його учнів, що вказує на актуальність наукових досліджень та їх високий рівень. Протягом останніх років за науковим напрямом школи імені Юрія Петровича Кунченка захищено три докторські дисертації, а також п'ять кандидатських дисертацій, які є продовженням наукового спадку Юрія Петровича Кунченка.

Молоді науковці продовжують розбудовувати міжнародні наукові зв'язки Черкаського державного технологічного університету у різних країнах світу (Німеччина, Австрія, Великобританія та ін.). Зокрема, професор В. В. Палагін, перебуваючи на стажуванні у Словаччині, гідно представив здобутки і розширив горизонти наукової співпраці.

Юрій Петрович Кунченко входив до складу редколегії «Вісника Черкаського інженерно-технологічного інституту» від дня його заснування і певний час як проректор з наукової роботи очолював редакцію «Вісника Черкаського державного технологічного університету». Завдяки його творчій енергії та відповідальності неухильно піднімався рівень наукових публікацій, що сприяло неодноразовому підтвердженню фахового статусу й авторитету нашого «Вісника» на національних та зарубіжних теренах.



Професор Ю. П. Кунченко в колі учнів та колег

ВІСНИК
Черкаського державного технологічного університету
1 • 2016

Статті друкуються в авторській редакції

Технічний редактор Давиденко К. В.
Коректура Костенко Т. В.
Комп'ютерна обробка і макетування Костенко О. А., Вознюк Т. І.

Видавець – Черкаський державний технологічний університет
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 896 від 16.04.2002 р.
Формат 60х84 1/8. Папір оф. Друк оперативний. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 11,4. Обл.-вид. арк. 12,5. Зам. № 16-0130.

Надруковано в редакційно-видавничому центрі ЧДТУ
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.