

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2018

---

# ВІСНИК

**Хмельницького**

**національного**

**університету**

*Том 1*

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2018, Issue 6, Volume 267, Part 1

Хмельницький

**ВІСНИК  
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
серія: Технічні науки**

Затверджений як фахове видання (перереєстрація)  
Наказ МОН 04.07.2014 №793

*Засновано в липні 1997 р.*

*Виходить 6 разів на рік*

---

**Хмельницький, 2017, № 6, Том 1 (267)**

---

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет  
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Включено до науково-метричних баз:

<b>Google Scholar</b>	<a href="http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAAJ</a>
<b>Index Copernicus</b>	<a href="http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3">http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3</a>
<b>РИНЦ</b>	<a href="http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650">http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650</a>
<b>Polish Scholarly Bibliography</b>	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</a>

<b>Головний редактор</b>	<b>Скиба М. Є.</b> , д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету
<b>Заступник головного редактора</b>	<b>Синюк О. М.</b> , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
<b>Голова редакційної колегії серії "Технічні науки"</b>	<b>Бойко Ю.М.</b> , д.т.н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету
<b>Відповідальний секретар</b>	<b>Гуляєва В. О.</b> , завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

**Ч л е н и р е д к о л е г і ї**

*Технічні науки*

Березненко С.В., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н. Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Говорущенко Т.О., д.т.н., Гордеев А.І., д.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Жултовський Б., д.т.н. (Польща), Зубков А.М., д.т.н., Каплун В.Г., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія), Костогриз С.Г., д.т.н., Лунтовський А.О., д.т.н. (Німеччина), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Натріашвілі Т.М., д.т.н. (Грузія), Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Попов В., доктор природничих наук (Німеччина), Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Ройзман В.П., д.т.н., Сарібеков Д.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатиї Р.В., д.т.н., Сурженко Є.Я., д.т.н. (Росія), Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Ясній П.В., д.т.н., Tomasz Kalaczynski, PhD (Польща), Elsayed Ahmed Elnashar, PhD (Єгипет).

<i>Технічний редактор</i>	Горященко К. Л., к.т.н.
<i>Редактор-коректор</i>	Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 3 від 27.11.2018 р.**

**Адреса редакції:** редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

<b>☎</b>	(038-2) 67-51-08	<b>web:</b>	<a href="http://journals.khnu.km.ua/vestnik">http://journals.khnu.km.ua/vestnik</a>
<b>e-mail:</b>	<a href="mailto:visnyk.khnu@gmail.com">visnyk.khnu@gmail.com</a>		<a href="http://vestnik.khnu.com.ua">http://vestnik.khnu.com.ua</a>
			<a href="http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm">http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm</a>

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
**Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року**

© Хмельницький національний університет, 2018  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2018

## ЗМІСТ

**МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ**

<b>В.В. СТАЦЕНКО, О.П. БУРМІСТЕНКОВ, Т.Я. БІЛА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПЛИНУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В БУНКЕРНИХ ПРИСТРОЯХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	7
<b>В.Г. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕННКО</b> ВПЛИВ ТЕРМОАКТИВУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ АЗОТОВАНИХ ШАРІВ .....	15
<b>С.М. БОЙКО, Ю.М. ШМЕЛЕВ, Е.Е. ВОЛКАНИН, О.М. БОРИСЕНКО, С.Я. ВИШНЕВСКИЙ</b> ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА .....	21
<b>В.П. РОЙЗМАН, І.І. КОВТУН, Б.О. ЖУХОРОВ</b> ОЦІНКА ВІБРАЦІЙ В КОНСТРУКЦІЯХ БЛОКІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ .....	26
<b>YU. MALOGULKO, V. KHAVTYRKO, M. ZATKHAU</b> IMPROVEMENT OF THE CLASSIFICATION SYSTEM FOR POWER TRANSFORMER DEFECTS .....	31
<b>О.Ю. ОЛІЙНИК, О.С. ЧОРНА, Д.А. ЛОСІХІН</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРОЧАСТОТНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ПРИРОДНИХ ІНТЕНСИФІКУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ .....	36
<b>В.В. СТРЕЛЬБИЦКИЙ</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА СВЕРЛ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ .....	42

**ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

<b>І.Т. СОЛТИК, А.Б. ДОМБРОВСЬКИЙ, Т.А. НАДОПТА</b> РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОРТОПЕДИЧНОГО ВЗУТТЯ ДЛЯ ДІТЕЙ ВІКОМ 4,5–10 РОКІВ З ПЛОСКОВАЛЬГУСНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ СТОП .....	46
<b>Н.В. МИХАЙЛОВА, В.О. ПРИВАЛА</b> ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ І ОЦІНКИ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЕЦІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗОЛЮЮЧОГО КОСТЮМА ПРАЦІВНИКІВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ .....	50
<b>Т.О. КОЛЕСНИК, О.А. АНДРЕЄВА, А.В. НІКОНОВА</b> ДІЯ ВОДИ ТА ЕЛЕКТРОЛІТІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ШКІРЯНОГО ПЕРГАМЕНТУ .....	54
<b>Е.С. ПОСКАННАЯ, В.Н. САКЕВИЧ</b> СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИСКУССТВЕННОГО МЕХА ПРИ ЗАМАСЛИВАНИИ ЕГО ВОЛОКОН ЭМУЛЬСОЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК .....	58
<b>Т.В. ІВАНІШЕНА, О.О. ІВАНІШЕНА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МІГРАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З УПАКОВКИ .....	64
<b>Н.М. ЛИТВИНЕНКО</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛАСТИЧНИХ БАНДАЖНИХ СТРІЧОК .....	70

## РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

<b>Ю.М. БОЙКО, О.І. ЄРЬОМЕНКО, О.В. КОСТЕНКО</b> АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕКОДУВАННЯ САМООРТОГОНАЛЬНИХ КОДІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ІЗ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ .....	76
<b>І.С. ПЯТІН, В.В. МІШАН, Д.В. ВЕРШКОВ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДНИХ КОДІВ ТА ТУРБОКОДІВ .....	85
<b>О.В. БАРМАК, О.В. МАЗУРЕЦЬ</b> ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ СЕМАНТИЧНОЇ СТРУКТУРИ НАВЧАЛЬНОГО КУРСУ .....	92
<b>Т.О. ГОВОРУЩЕНКО, В.М. СТЕЦЮК, І.Ю. ЛОПАТТО</b> ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ ВИКЛАДАЧА ТА КАФЕДРИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ .....	98
<b>О.І. ПОЛКАРОВСЬКИХ, О.М. КОРОТИНСЬКИЙ</b> МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ШВИДКОДЮЧИХ СУМАТОРІВ У ЯДРІ СИНТЕЗАТОРА .....	105
<b>О.І. ПОЛКАРОВСЬКИХ, А.В. СЛАВІНСЬКИЙ</b> МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ СПЕКТРУ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ФАЗОВОГО АКУМУЛЯТОРА .....	111
<b>В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, М.В. МАРИНІН</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ .....	116
<b>А.С. КАШТАЛЬЯН</b> СЕГМЕНТАЦІЯ ТА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ АУДІО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ПРИХОВАНОЇ МАРКІВСЬКОЇ МОДЕЛІ .....	123
<b>В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, Д.Г. ШАШКОВ</b> ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ НАЙКВІСТОВОГО ЕЛЕМЕНТА НА ОСНОВІ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	128
<b>І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, А.В. ТКАЧУК</b> СИНТЕЗ КОГЕРЕНТНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ІМПУЛЬСІВ З ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ І НЕЛІНІЙНИМИ КРОКАМИ НОСІЙНОЇ .....	134
<b>А.О. БЕРЕЗА, Т.В. ГРИЩУК, В.В. КОВТУН</b> ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СЕАНСУ РОЗПІЗНАВАННЯ ОСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ .....	143
<b>О.Ю. МЄШКОВ, Д.М. БАРАНОВСЬКИЙ</b> РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТЕРІЮ АУТЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ НА ОСНОВІ ЛОКАЛІЗОВАНИХ СТРУКТУР ГОЛОСОВОГО СИГНАЛУ .....	151
<b>Т.М. МАНСУРОВ, Ч.П. АЛИЕВ, Г.И. ГУЛИЕВА, Э.Т. МАНСУРОВ</b> ФОТОННИЙ КОММУТАТОР КВАНТОВОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ І ОПТИЧЕСКОГО ШУМА ПО КВАНТОВОМУ КАНАЛУ СВ'ЯЗИ .....	157
<b>А.О. ШЕРОК</b> ON OPTIMUM OF EM ENERGY TRANSPORT ALONG 1D NANOSCALE SIMPLE METAL WAVEGUIDES WITH $\perp$ - AND $\perp$ -JUNCTIONS .....	166
<b>А.Ю. ВОЛОВИК, Д.В. ГАВРІЛОВ, В.С. МОЗГОВИЙ</b> РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТРАЕКТОРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ПОСАДКОВОЇ СИСТЕМИ .....	173



<b>В.Т. КОНДРАТОВ</b> ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ. МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 4. МАГНИТОПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....	183
<b>Г.І. МІХАЛЕВСЬКА, В.Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ</b> ДЕЯКЕ МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ .....	198
<b>О.Є. РУБАНЕНКО, Є.А. БОНДАРЕНКО, І.О. ГУНЬКО, А.М. КОВАЛЬ</b> ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ .....	204
<b>В.Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ, Г.І. МІХАЛЕВСЬКА</b> ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЛІНІЙНОГО ОБЛІКУ .....	214
<b>А.О. АЗАРОВА, О.М. РОЙК, А.В. ПОПЛАВСЬКИЙ, Д.П. ПРИСЯЖНИЙ, І. С. КАПЛУН</b> ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ВИПУСКНИКІВ ТЕХНІЧНИХ ВИШІВ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ .....	219
<b>Ю.М. БОЙКО, І.І. КОВТУН, С.В. ПЕТРАЩУК, О.В. КОВАЛЬЧУК</b> МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОЇ ДІАГНОСТИКИ НАДІЙНОСТІ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ МОДУЛІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ .....	227
<b>В.П. РОЙЗМАН, І.І. КОВТУН, О.К. БЛИК</b> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДРОТЯНИХ МАЛОБАЗНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДІЙСНИХ ЗНАЧЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ .....	234
<b>О.В. СУХОВЕЦЬКИЙ, Р.О. БАГРІЙ, Т.К.СКРИПНИК</b> ОГЛЯД СИСТЕМ ВЕБ-АНАЛІТИКИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГУ .....	239
<b>С.Л. ГОРЯЩЕНКО, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, Е.Ю. ВЖЕЩ</b> МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ .....	243
<b>М.Н. КУХАРЧУК, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК</b> ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ЗАКЛАДІВ ГРОМАДСЬКОГО ХАРЧУВАННЯ .....	248
<b>К.І. РОЙЗНЕР, О.В. МАЗУРЕЦЬ</b> ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІЯЛЬНОСТІ РЕЛІГІЙНОЇ УСТАНОВИ .....	252
<b>О.П. НИЧ, В.І. СТЕЦЮК, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, ПІТЕР ШІДЕР</b> РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ .....	257
<b>V. V. ROMANUK</b> OPTIMIZATION OF A DATASET FOR A MACHINE LEARNING TASK BY CLUSTERING AND SELECTING CLOSEST-TO-THE-CENTROID OBJECTS .....	263
<b>ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ</b>	
<b>Є.Є. ВОЛКАНІН, С.М. БОЙКО, О.Ф. КРИШАН, С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, О.М. НАНАКА</b> АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИСОКОГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ .....	266
<b>К.В. БАЗІЛО</b> СХЕМА РОЗРАХУНКУ ДИСКОВОГО П'ЄЗОЕЛЕМЕНТА З ЧАСТКОВИМ ЕЛЕКТРОДУВАННЯМ ПОВЕРХОНЬ .....	271
<b>Т.М. КИСІЛЬ, О.Я. КУЧЕРУК, Т.О. ОСІЙЧУК</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКРЯЖУВАННЯ КРУГЛИХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ .....	282

---

**A.O. CHEPOK**

COMPUTER MODELING OF FLOWER PISTIL THERMOREGULATION ..... 285

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-7-14  
УДК 621:542.3

В.В. СТАЦЕНКО, О.П. БУРМІСТЕНКОВ, Т.Я. БІЛА  
Київський національний університет технологій та дизайну

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПЛИНУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В БУНКЕРНИХ ПРИБОРАХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*У роботі розглядається моделювання процесу руху сипких матеріалів у циліндрично-конічному бункері методом дискретних елементів. Наведені принципи застосування методу, математична модель взаємодії частинок та результати аналізу характеру руху частинок у поперечному перерізі бункера. Проведені експериментальні дослідження впливу коефіцієнтів тертя ковзання та кочення частинок на продуктивність бункера та отримана математична модель. Визначено залежності між кутом природного укосу та коефіцієнтами тертя кочення і ковзання сипкого матеріалу.*

*Ключові слова:* бункер, метод дискретних елементів, МДЕ, сипкий матеріал, математичне моделювання.

V. V. STATSENKO, O. P. BURMISTENKOV, T. Y. BILA  
Kyiv National University of Technologies and Design

## THE INVESTIGATION OF BULK MATERIALS MOVEMENT IN BUNKER DEVICES BY DISCRETE ELEMENTS METHOD

*The paper considers the simulation of the bulk material movement process in a cylindrical-conical bunker by discrete elements method. The principles of the method application, the particle interaction mathematical model and the analysis results of the particles motion nature in the bunker cross section are shown. During the simulation, each particle was considered as a spherical object. The laws of Newton and contact mechanics were used for creating a mathematical model. Based on the developed model, the bunker productivity values for different types of materials are obtained. The particles positions are shown in the bunker cross section at different points in time. To confirm the analytical studies results, a full factorial experiment of type 2<sup>2</sup> has been carried out. As a result, a relationship has been obtained between the bunker productivity and the sliding and rolling friction particles coefficients. Dependences between the natural slope angle and rolling and sliding friction coefficients of bulk material are determined. This allowed us to obtain a model of the bulk material movement in the bunker, the initial parameter for which is the material natural slope angle. It was determined that the sliding and rolling friction coefficients determine the bulk material movement, in the case of constant bunker geometric parameters. It was established that the coefficients of sliding friction and rolling determine the material repose angle and can vary depending on environmental parameters, for example, humidity. It was determined that reducing the friction coefficients values increases the bunker productivity and at the same time reduces the material repose angle, respectively, the material movement nature became similar to the liquid flow.*

*Key words:* bunker, discrete element method, DEM, bulk material, mathematical modelling.

### Вступ

У різних галузях промисловості широко використовуються бункерні пристрої для зберігання та накопичення сипких матеріалів [1, 2]. Ці пристрої в більшості випадків є початковим елементом у технологічних процесах безперервного приготування композицій із сипких матеріалів або їх дозування та пакування (борошно, цукор, крупи в харчовій промисловості; гранульований поліетилен, полістирол, полівінілхлорид тощо в хімічній, легкій промисловості) [3, 4]. Технологічні лінії безперервної обробки сипких матеріалів [12], як правило, автоматизовані та механізовані, але їх продуктивність і якість кінцевого продукту не завжди відповідають вимогам виробництва. Структура та параметри потоку сипкого матеріалу (наявність пульсацій, грудок, порушення безперервності) на всіх стадіях технологічного процесу визначають закони автоматичного регулювання відповідним обладнанням. Тому визначення характеру руху та його зв'язку з певними фізико-механічними властивостями сипкого матеріалу є актуальним.

### Постановка завдання

Завданням дослідження є вивчення характеру витікання матеріалу з бункера та впливу на нього фізико-механічних властивостей сипких матеріалів і конструктивних параметрів бункера. В якості методу дослідження використано метод дискретних елементів (МДЕ).

### Результати та їх обговорення

Відомо, що процес витікання сипкого матеріалу з бункера може носити нормальний або гідравлічний характер [2]. В ряді досліджень отримані залежності, що можна використовувати в інженерній практиці для побудови математичних моделей як окремих ланок технологічного процесу, так і лінії в цілому. Водночас, дослідження зв'язку плинності сипкого матеріалу із його фізико-механічними властивостями, що визначають не тільки параметри витікання матеріалу з бункера, але і його рух по всіх стадіях технологічного процесу, представляє науковий інтерес і в даний час [5, 6].

У роботі для розв'язання поставленої задачі використано метод дискретних елементів (МДЕ) [7], який дозволяє здійснювати моделювання руху та механічної взаємодії частинок сипких матеріалів. Під час використання МДЕ кожна частинка матеріалу розглядається як окремий об'єкт, що взаємодіє з іншими частинками та внутрішньою поверхнею бункера. При цьому використовуються закони Ньютона та контактної механіки для створення математичної моделі руху частинок, тобто рух сипкого матеріалу

аналізується із урахуванням його дискретної природи, яка може призводити до виникнення розривів у потоці матеріалу (наприклад, внаслідок утворення склепінь). Це дозволяє висунути гіпотезу, що використання МДЕ дозволить математично описати особливості руху сипкого матеріалу, які не можуть бути враховані іншими методами, в тому числі, в рамках теорії руху суцільних середовищ. Результуюча математична модель надасть можливість проаналізувати роботу обладнання з урахуванням дискретної природи матеріалу та появи розривів у його потоці. Також використання МДЕ дозволяє отримати інформацію про положення, центр ваги, напрямку руху на швидкість кожної частинки матеріалу, що практично неможливо при проведенні натурального експерименту.

Під час моделювання за допомогою МДЕ сипкий матеріал розглядається у вигляді сукупності окремих пружних частинок сферичної форми із радіусом  $R$ . Відповідно законам класичної механіки рух частинки можна описати за допомогою наступних рівнянь:

$$m \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_i,$$

$$I_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = M_i,$$

де  $t$  – час;  $m_i, I_i$  – маса та момент інерції  $i$ -ї частинки, відповідно;  $F_i$  – сума сил, що діють на частинку;  $M_i, x_i, \theta_i$  – момент інерції, положення та кут повороту  $i$ -ї частинки, відповідно.

Суму сил, що діють на частинку, можна представити як сукупність сил, які діють збоку інших частинок  $F_{ij}$ , та сили тяжіння:

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij} + m_i g.$$

Аналогічне співвідношення можна записати для моменту:

$$M_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N M_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_i - x_j) F_{ij} \quad M_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N M_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_i - x_j) F_{ij}.$$

Поверхневі сили  $F_{ij}$  складаються із сил відштовхування та сил тертя.

Розрахунки положення частинок здійснюються з певним кроком за часом, тому при взаємодії частинок в певний момент часу вони частково «перекриваються» (рис. 1). За величиною «перекриття»  $\delta$  можна визначити величину нормальної складової сили, що діє між частинками.

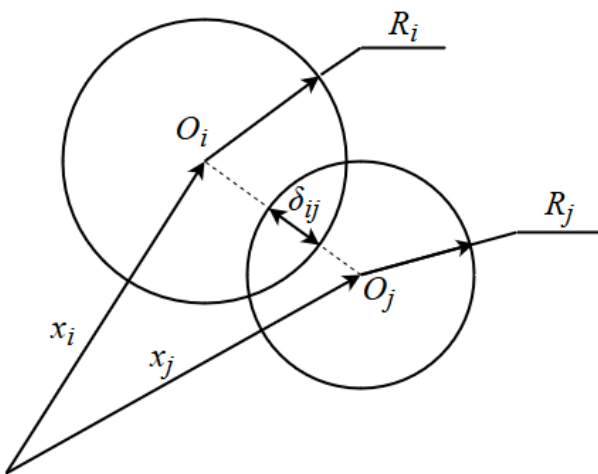


Рис. 1. Схема розташування частинок при їх взаємодії

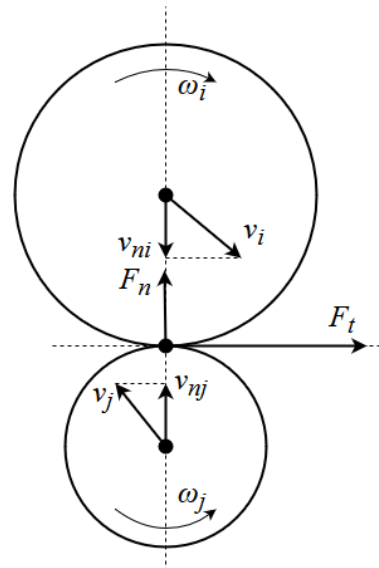


Рис. 2. Розрахункова схема дії сил при контакті частинок

В роботі розрахунок нормальної складової сили  $F_n$  виконувався відповідно до контактної теорії Герца [8], а розрахунок тангенціальної складової сили  $F_t$  – на основі роботи Міндліна-Дересєвіча [9]. Для обох складових сили розраховувались демпфуючі компоненти, що визначаються коефіцієнтами пружності [10]. Тангенціальна сила тертя визначалась за законом Кулона, а сила тертя кочення – виходячи з обертового моменту частинок.

Нормальна складова сили (сила відштовхування)

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R \delta_n^3},$$

де  $\delta_n$  – «перекриття» частинок;

$$E^* E^* - \text{еквівалентне значення модуля Юнга, } \frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j};$$

$R^* R^*$  – еквівалентне значення радіусу,  $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$ ;

$E_i, \nu_i, R_i, E_j, \nu_j, R_j$  – значення модулів Юнга, коефіцієнтів Пуассона та радіусів сфер (частинок), між якими розраховується взаємодія.

Нормальна складова сили пружності визначалась за формулою:

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^* v_n^{rel}},$$

де  $m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)^{-1}$   $m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)^{-1}$  – еквівалентна маса,  $v_n^{rel} = v_n^{rel}$  – нормальна складова відносної швидкості.  $\beta$  та  $S_n$  (нормальна жорсткість) дорівнюють:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}},$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}.$$

де  $e$  – коефіцієнт пружності.

Тангенціальна сила  $F_t$  розраховувалась як добуток значень тангенціального перекриття  $\delta_t$  та тангенціальної жорсткості  $S_t$ :

$$F_t = -S_t \delta_t,$$

де  $S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}$ .

$G^* G^*$  – еквівалентний модуль зсуву.

Тангенціальна складова сили пружності визначалась за формулою:

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^* v_t^{rel}} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^* v_t^{rel}},$$

де  $v_t^{rel}$  – відносна тангенціальна швидкість. Зазначимо, що тангенціальна сила обмежена величиною Кулонового тертя  $\mu_s F_n$ , де  $\mu_s$  – коефіцієнт статичного тертя.

У випадках, коли необхідно врахувати силу тертя кочення, у розрахунки додатково включається величина крутного моменту поверхонь, що контактують.

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i,$$

де  $\mu_r$  – коефіцієнт тертя кочення;  $R_i$  – відстань від точки контакту до центру маси частинки;  $\omega_i$  – одиничний вектор кутової швидкості об'єкту в точці контакту.

У роботі розглянуто процес витікання сипкого матеріалу з циліндрично-конічного бункера з кутом нахилу бічних стінок 45°. При проведенні моделювання процесу витікання частинок сипкого матеріалу з бункера необхідно задати параметри для двох моделей взаємодії: «частинка – частинка» та «частинка – матеріал корпусу бункера». В роботі для обох взаємодій використовувалась теорія пружного контакту Герца-Міндліна (без урахування ковзання), що описана вище. Параметри моделювання наведені у таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

**Параметри матеріалів**

	Частинки сипкого матеріалу	Матеріал корпусу бункера
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,3
Густина, кг/м <sup>3</sup>	950	7800
Модуль зсуву, Па	1,7*10 <sup>8</sup>	7*10 <sup>10</sup>
Модуль Юнга, Па	3,042*10 <sup>8</sup>	1,82*10 <sup>11</sup>
Радіус, мм	2	
Маса, кг	3,183* 10 <sup>-5</sup>	
Об'єм, м <sup>3</sup>	3,351*10 <sup>-8</sup>	
Момент інерції, кг*м <sup>2</sup>	5,094*10 <sup>-11</sup>	

Таблиця 2

**Параметри взаємодії об'єктів**

	«частинка – частинка»	«частинка – матеріал корпусу бункера»
Коефіцієнт пружності	0,1	0,2
Коефіцієнт статичного тертя	0,9	0,9
Коефіцієнт тертя кочення	0,05	0,01

Проведено дослідження трьох матеріалів із параметрами, які представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

**Параметри сипких матеріалів**

№ матеріалу	Коефіцієнт тертя ковзання	Коефіцієнт тертя кочення	Час витікання матеріалу, с	Маса матеріалу, кг	Масова продуктивність, кг/с
1	0,9	0,05	9,75	0,223	0,0229
2	0,2	0,05	7,4	0,223	0,0301
3	0,545	0,01	7,9	0,223	0,0282

Отримані залежності між кількістю матеріалу, що витік з бункера, та часом, тобто продуктивності бункера, наведена на рис. 3.

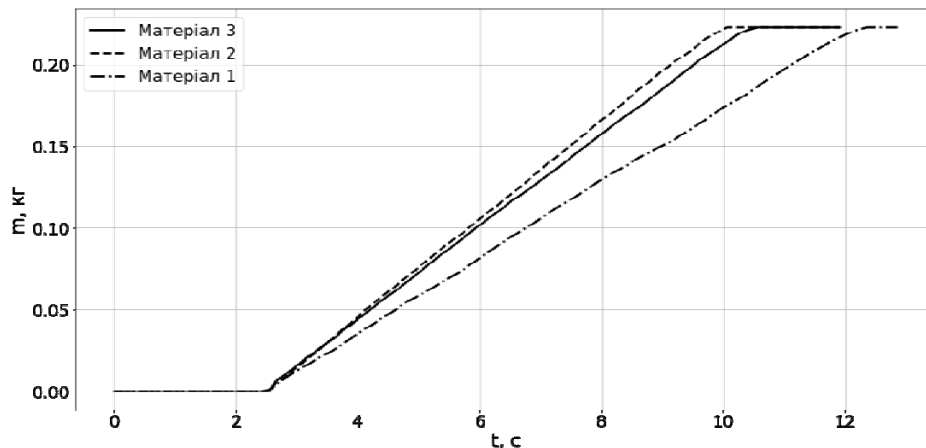


Рис. 3. Залежність продуктивності бункера від параметрів матеріалу

Під час моделювання визначалось положення частинок в центральному перерізі бункера. На рис. 4, а-з показані кількість та положення частинок при витіканні матеріалу № 1 із кроком 1 с.

Результати досліджень свідчать:

- продуктивність бункера є сталою величиною і не залежить від кількості матеріалу в ньому, що співпадає з результатами експериментальних досліджень;
- величина продуктивності залежить від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу, що також підтверджується результатами експериментальних досліджень;
- встановлено, що характер плинучості частинок матеріалу є нормальним, тобто матеріал, розташований біля центральної вісі бункера, витікає з нього швидше, ніж матеріал, розташований вздовж бічних стінок;
- моделювання за допомогою МДЕ дозволило проаналізувати рух окремих частинок матеріалу та визначити наявність потоків частинок із різними швидкостями всередині бункера, які є характерними для нормального витікання матеріалу.

При використанні МДЕ враховувались наступні параметри частинок сипкого матеріалу: геометричні розміри, коефіцієнти тертя кочення та ковзання, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. В реальних умовах для сипких полімерних матеріалів зміна розмірів, модулю пружності та коефіцієнту Пуассона є малоймовірною. Водночас, змінювання коефіцієнтів тертя може виникнути внаслідок зміни, наприклад, вологості оточуючого середовища, яку технічно складно контролювати.

Тому в роботі проведено повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 22 [11]. Вхідними параметрами (факторами) обрано коефіцієнти ковзання  $k_{\text{ков}}$  та кочення  $k_{\text{коч}}$  із наступними діапазонами зміни значень:

$$k_{\text{ков}} = 0,3..0,7$$

$$k_{\text{коч}} = 0,05..0,2$$

Вихідною величиною (функцією відгуку) прийнято продуктивність дозатора.

Результати досліджень показані на рис. 5. Точками показана кількість частинок, що вийшла з бункера у відповідний момент часу. Враховуючи, що розміри та щільність частинок є сталими величинами, значення кількості частинок, що витікають із бункера за заданий проміжок часу, визначає як масову, так і об'ємну продуктивність.

Процес витікання частинок можна умовно розділити на дві частини:

1) вихідний отвір бункера повністю заповнений, в цьому випадку продуктивність є сталою величиною.

2) кількість матеріалу в бункері не достатня для повного заповнення вихідного отвору, залишки матеріалу рухаються вздовж країв отвору. В цьому випадку продуктивність зменшується.

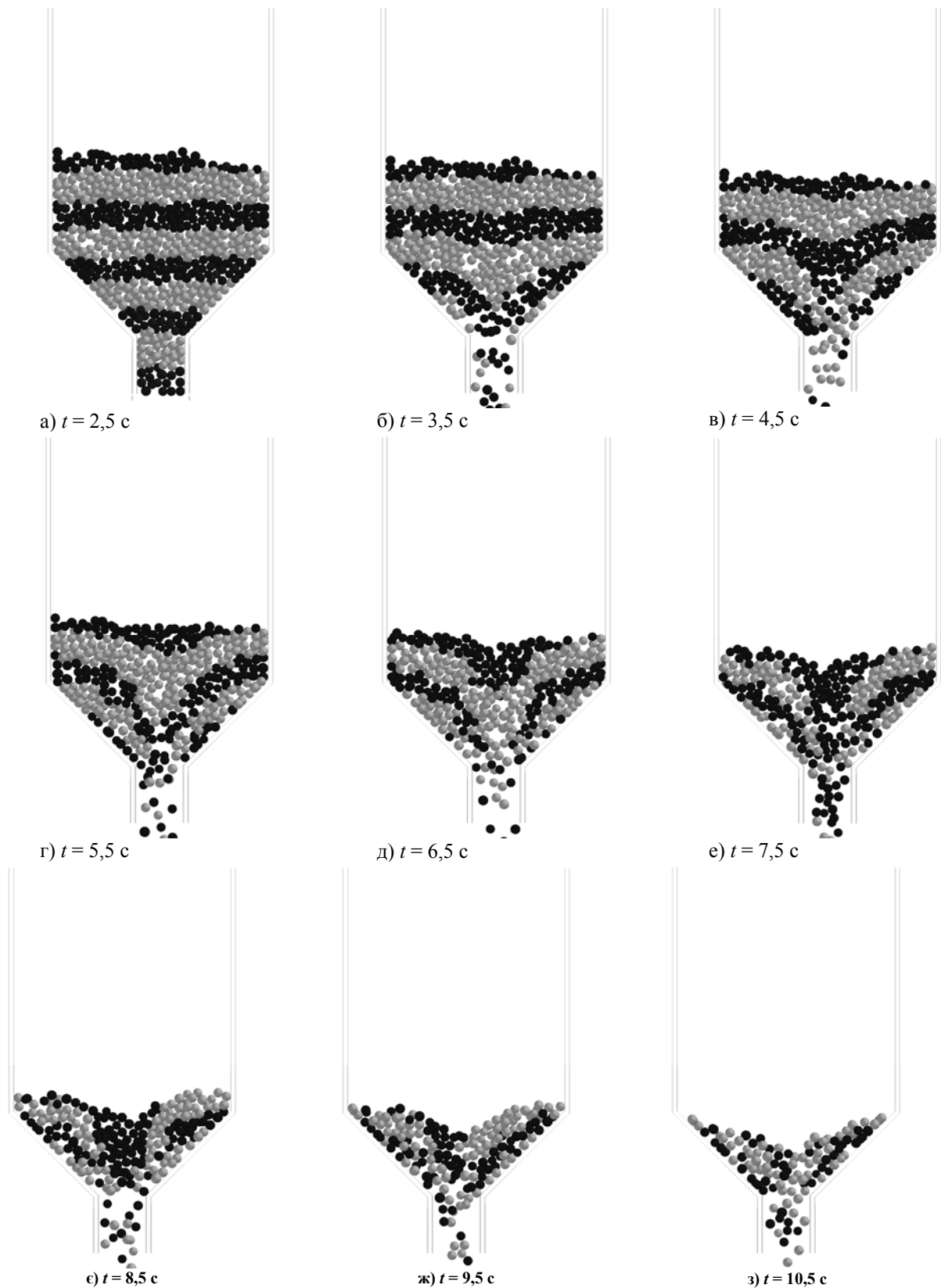


Рис. 4. Зміювання положення частинок у бункері за часом

Другу частину процесу розглядати немає сенсу, оскільки вона відповідає режиму, за якого в бункері відсутній достатній запас матеріалу для того, щоб забезпечити задану продуктивність. Тому для визначення продуктивності використовувались перші 75% отриманих значень, тобто лінійна частина залежності. Для цих значень розраховані коефіцієнти лінійних залежностей (показані суцільними лініями на рис. 5).

Нормування факторів здійснювалось за наступною формулою:

$$\bar{k}_i = \frac{2(k_i - k_{i\text{сеп}})}{k_{i\text{max}} - k_{i\text{min}}},$$

де  $k_{i\text{сер}}$   $k_{i\text{сер}}$  – середнє значення відповідного коефіцієнту ковзання;  
 $k_{i\text{max}}$ ,  $k_{i\text{min}}$   $k_{i\text{max}}$ ,  $k_{i\text{min}}$  – максимальнє та мінімальнє значення відповідного коефіцієнту ковзання;  
 $k_i$ ,  $k_i$  – поточнє значення відповідного коефіцієнту ковзання.

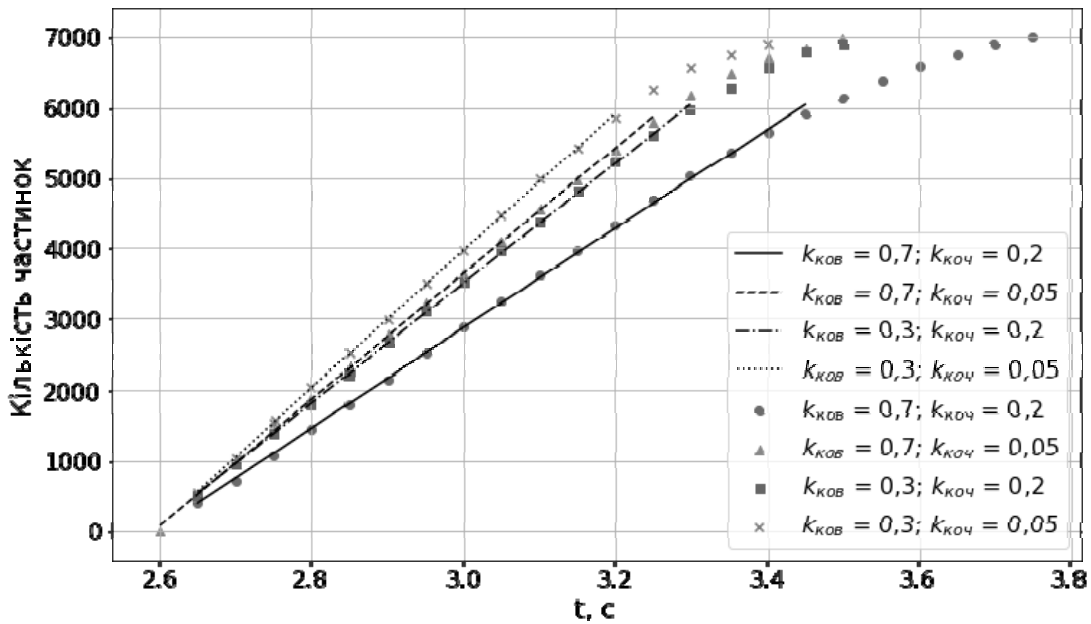


Рис. 5. Залежність продуктивності бункеру від коефіцієнтів тертя

Таким чином, максимальнє значення коефіцієнту в нормованому вигляді дорівнюватимуть «+1», а мінімальнє – «-1». Середнє значення дорівнюватимуть «0».

Матриця планування з результатами ПФЕ наведена у таблиці 4.

Таблиця 4

Матриця планування ПФЕ типу 2<sup>2</sup> та результати дослідів

№ п/п	$k_0$	$k_{\text{КОВ}}$	$k_{\text{КОЧ}}$	$k_{\text{КОВ}}, k_{\text{КОЧ}}$	$Q$ , кг/с
1	+1	+1	+1	+1	0,0679
2	+1	+1	-1	-1	0,0857
3	+1	-1	+1	-1	0,0817
4	+1	-1	-1	+1	0,0937

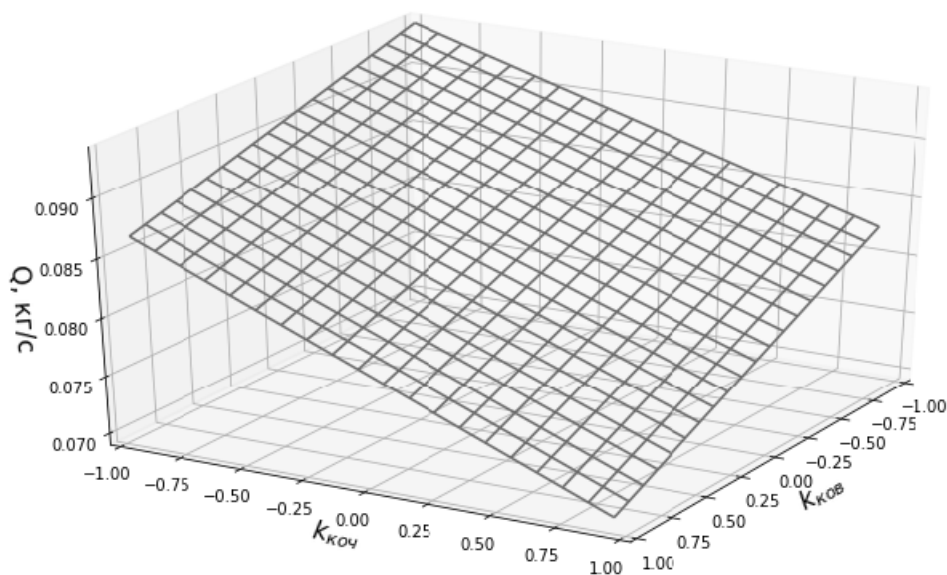


Рис. 6. Залежність продуктивності бункеру від коефіцієнтів тертя



Математична модель, що описує вплив коефіцієнтів тертя на продуктивність дозатора, має вигляд:

$$Q = b_0 + b_1 k_{ков} + b_2 k_{коч} + b_3 k_{ков} k_{коч},$$

де коефіцієнти  $b$  визначаються за формулою:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N k_{ij} Q_i,$$

де  $N$  – кількість дослідів.

В результаті проведених розрахунків отримані наступні значення коефіцієнтів:

$$Q = 0,0823 - 0,00541 k_{ков} - 0,00748 k_{коч} - 0,00146 k_{ков} k_{коч}.$$

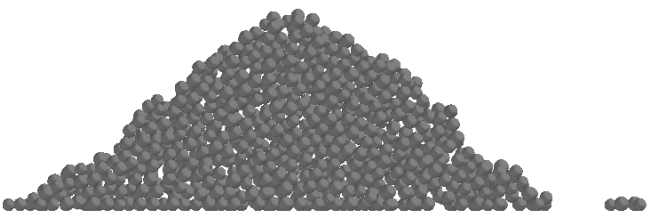
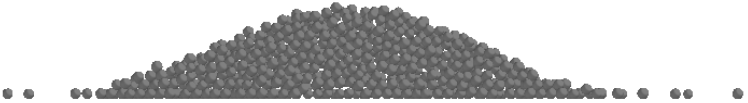
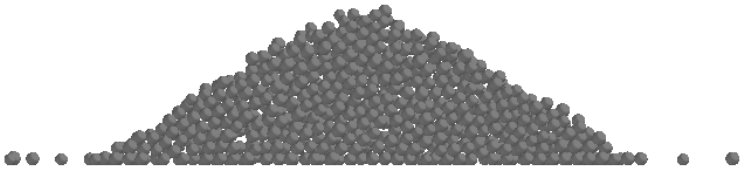
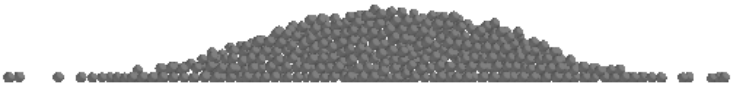
Графічно залежність продуктивності від коефіцієнтів тертя показана на рис. 6.

Отримані результати підтверджують, що найбільше значення продуктивності бункера відповідає найменшим значенням коефіцієнтів тертя ковзання та кочення.

Аналогічна залежність отримана для коефіцієнтів тертя та кутів природного укошу матеріалу. У табл. 5 для всіх проведених дослідів показано розташування частинок після витікання із бункера та наведені значення кутів природного укошу.

Таблиця 5

Залежність кута природного укошу від коефіцієнтів тертя

№ п/п	$k_{ков}$	$k_{коч}$	Кут природного укошу, град	
1	0,7	0,2	36,13	
2	0,7	0,05	19,32	
3	0,3	0,2	29,18	
4	0,3	0,05	15,00	

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що коефіцієнти тертя кочення і ковзання, кути природного укошу і насипна маса сипких матеріалів визначають його рух в бункері та продуктивність. Якщо прийняти до уваги, що продуктивність подальшого обладнання (живильників, дозаторів і змішувачів) також визначається цими параметрами [6], тоді проведені дослідження дозволяють прогнозувати продуктивність технологічного процесу приготування композицій з сипких матеріалів в цілому.

#### Висновки:

1) Параметрами, що визначають рух сипкого матеріалу, за умови незмінних геометричних параметрів бункера та частинок, є коефіцієнтами тертя ковзання та кочення.

2) Коефіцієнти тертя ковзання та кочення визначають кут природного укошу матеріалу і можуть змінюватись залежно від параметрів оточуючого середовища, наприклад, вологості.

3) Зменшення значень коефіцієнтів тертя збільшує продуктивність бункера та одночасно зменшує кут природного укошу матеріалу, відповідно характер руху матеріалу наближається до плинну рідини.

4) Отримані залежності дозволяють прогнозувати продуктивність бункерних пристроїв в технологічному процесі виготовлення композицій з сипких матеріалів.

## Література

1. Процеси та обладнання підготовчих виробництв лёгкої промисловості / [О. П. Бурмістенков, О. А. Стародуб, В. П. Місяць та ін.]. – К. : КНУТД, 2011. – 137 с.
2. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Гячев Л. В. – Новосибирск : Изд-во Новосибирского университета, 1992. – 311 с.
3. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості / [О. П. Бурмістенков, Б. М. Злотенко, В. П. Коновал та ін.]. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 255 с.
4. Переробка відходів гуми та термопластичних матеріалів / [О. П. Бурмістенков, В. П. Місяць, І. В. Панасюк, Б. М. Злотенко]. – К. : Кафедра, 2012. – 240 с.
5. Стаценко В.В. Системна і параметрична моделі бункерних пристроїв в агрегатах для приготування композицій із сипких матеріалів / Біла Т.Я., Бурмістенков О.П. // Вісник КНУТД. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 60–69.
6. Стаценко В.В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів : монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ : КНУТД, 2017. – 220 с.
7. Ante Munjiza. The Combined Finite-Discrete Element Method. Wiley, 2004. 333 p.
8. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. – М. : Физматлит, 2012.– 348 с.
9. Mindlin, R.D. and Deresiewicz, H. (1953) Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 20, 327–344.
10. Y. Tsuji, T. Tanaka, T. Ishida. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology. Volume 71, Issue 3. 239–250.
11. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 282 с.
12. Біла Т. Я. Автоматичні системи керування процесом змішування та режимами роботи змішувального обладнання / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 2. – С. 46–48.

## References

1. Protsesy ta obladnannia pidhotovchykh vyrobnytstv lehkoi promyslovosti / [O. P. Burmistenkov, O. A. Starodub, V. P. Misiats ta in.]. – K. : KNUTD, 2011. – 137 s.
2. Hiachev L. V. Osnovy teorii bunkerov / Hiachev L. V. – Novosybyrsk : Yzd-vo Novosybyrskoho unyversyteta, 1992. – 311 s.
3. Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti / [O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval ta in.]. – Khmelnytskyyi : KhNU, 2007. – 255 s.
4. Pererobka vidkhodiv humy ta termoplastychnykh materialiv / [O. P. Burmistenkov, V. P. Misiats, I. V. Panasiuk, B. M. Zlotenko]. – K. : Kafedra, 2012. – 240 s.
5. Statsenko V.V. Systemna i parametrychna modeli bunkernykh prystroiv v ahrehatakh dlia pryhotuvannia kompozytsii iz sypkykh materialiv / Bila T.Ia., Burmistenkov O.P. // Visnyk KNUTD. Tekhnichni nauky. – 2016. – № 6. – С. 60–69.
6. Statsenko V.V. Avtomatyzovani komplekxy bezpererвноho pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv : monohrafiia / V.V. Statsenko, O.P. Burmistenkov, T.Ia. Bila. – Kyiv : KNUTD, 2017. – 220 s.
7. Ante Munjiza. The Combined Finite-Discrete Element Method. Wiley, 2004. 333 r.
8. Popov V. L. Mekhanyka kontaktnoho vzaymodeistvyia y fyzyka trenyia / V. L. Popov. – M. : Fyzmatlyt, 2012.– 348 с.
9. Mindlin, R.D. and Deresiewicz, H. (1953) Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 20, 327–344.
10. Y. Tsuji, T. Tanaka, T. Ishida. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology. Volume 71, Issue 3. 239–250.
11. Adler Yu. P. Planyrovanye eksperymenta pry poyske optymalnykh uslovyi / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Hranovskyi. – M. : Nauka, 1971. – 282 s.
12. Bila T. Ya. Avtomatychni systemy keruvannia protsesom zmishuvannia ta rezhymamy roboty zmishuvalnoho obladnannia / T. Ya. Bila, V. V. Statsenko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2006. – № 2. – С. 46–48.

Рецензія/Peer review : 24.10.2018 р.

Надрукована/Printed :21.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Петко І.В.

**ВПЛИВ ТЕРМОАКТИВУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ АЗОТОВАНИХ ШАРІВ**

*Проведені теоретичні дослідження впливу процесу термоактивування азотованого шару на перерозподіл азоту в азотованому шарі і, як наслідок, розпад крихкої  $\epsilon$ -фази, збільшення товщини азотованого шару та зменшення його градієнта твердості. Експериментальними дослідженнями сталі ШХ-15 встановлені залежності мікротвердості поверхні та її розподілу по товщині залежно від часу термоактивування при температурі її гартування. Наявність оксидної плівки на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище, що сприяє збільшенню дифузії азоту, що утворився при розпаді  $\epsilon$ -фази, всередині металу. Експериментальними дослідженнями визначені величини залишкових напружень в азотованих шарах після термоактивування при різних витримках.*

**Ключові слова:** іонне азотування, нітриди, оксиди, фаза, мікротвердість, дифузія, термоактивування.

V.G. KAPLUN, V.A. HONCHAR, T.V. DONCHENKO

Khmelnytskyi National University

**INFLUENCE OF THERMAL ACTIVATION ON PROPERTY OF THE NITRIDED LAYERS**

*Theoretical research on the influence of nitrated case thermal activation process on the redistribution of nitrogen in nitrated case was conducted and, as a consequence, collapse of fragile  $\epsilon$ -phase, increase of nitrated case thickness and decrease of its hardness gradient. By experimental researches of steel of SHKH-15 the set dependences of microhardness of surface and its distributing on a thickness depending on time of thermal activation at the temperature of its temperatures of hardening. In the absence of an oxide layer on the surface of the nitrided layer during thermal activation, the nitrogen formed after the decomposition of the nitride phases diffuses inside the metal and is partially combined with carbon into the environment. As a result, the hardness of the surface decreases and its redistribution in thickness, and the greater, the longer the exposure time at the temperature of the thermal activation is tape of oxide on-the-spot the nitrided layer a barrier to diffusion of nitrogen in an environment, which is instrumental in the increase of diffusion of nitrogen which appeared at disintegration  $\epsilon$ -phase, inward to the metal. By experimental researches certain sizes of remaining tensions in nitrogen layers after t thermal activation at different self-controls. Based on the conducted research, conclusions and recommendations on the application of thermal activated nitrogen coatings are made.*

**Keywords:** ionic nitriding, oxides, phase, microhardness, diffusion, thermal activation.

**Вступ.** Азотування є ефективним методом підвищення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик конструкційних елементів [1–11]. Азотовані шари характеризуються такими параметрами: товщиною до 550 мкм, мікротвердістю поверхні до 12 ГПа, яка змінюється по товщині, та фазовим складом, що включає  $\epsilon$ -фазу,  $\gamma'$ -фазу та  $\alpha$ -Fe<sub>[N]</sub> (твердий розчин азоту в залізі). На поверхні азотованого шару знаходиться нітридний зона, що складається в основному з твердої та крихкої  $\epsilon$ -фази і більш пластичної,  $\gamma'$ -фази з різною мікроструктурою та фізико-механічними властивостями. Під нітридною зоною знаходиться зона внутрішнього азотування з переважаючою  $\alpha$ -Fe<sub>[N]</sub> фазою зі змінною концентрацією азоту по товщині [1–4]. Властивості азотованого шару мають великий вплив на експлуатаційні властивості конструкційних елементів і вони потрібні різні для різних умов роботи [1–11].

Високоенергетичні методи азотування, зокрема іонне азотування в плазмі тліючого розряду, розширюють можливості даної технології, підвищуючи економічність та якісні показники процесу і дозволяють змінювати властивості азотованого шару в певних межах [5–11]. Застосування іонного азотування в безводневих середовищах для зміцнення поверхні відкриває нові можливості підвищення довговічності деталей машин, що працюють в умовах втомного руйнування при циклічному навантаженні, виключаючи шкідливий вплив водню на міцність металів [5, 7–9, 11]. Дослідження [3–5] показують, що  $\epsilon$ -фаза не стійка при температурах нагрівання вищих 600°C і переходить в нижчу  $\gamma'$ -фазу з виділенням азоту. Це дає можливість керувати фазовим складом азотованого шару з допомогою його термоактивування.

Дослідження [11] напружено-деформованого стану пластини з градієнтними покриттями показали, що несуча здатність композиції «покриття-основа» залежить від товщини, твердості та градієнта твердості по товщині покриття. Значний вплив на довговічність конструктивних елементів мають залишкові напруження стиску, які виникають в азотованих шарах і залежать від властивостей азотованого шару [7, 8, 10, 11]. Використовуючи термоактивування азотованих шарів можна змінювати та оптимізувати твердість, товщину, градієнт твердості та залишкові напруження азотованого шару відповідно до умов експлуатації деталей машин, що є актуальним питанням.

**Мета дослідження.** Визначити вплив термоактивування азотованих шарів на їх фазовий склад, фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

**Теоретичні дослідження.** Розглянемо процес дифузії, що описується рівнянням виду:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D[t(x, \tau)] \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right\}; \quad (1)$$

$$C(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$C(L, \tau) = 0, L \rightarrow \infty; \tag{3}$$

$$-D(0, \tau) \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = \beta [C_0^* - C(0, \tau)], \tag{4}$$

де  $D[t(x, \tau)]$  – коефіцієнт дифузії;  $\beta$  – коефіцієнт масоперенесення;  $C_0$  – концентрація на межі  $x = 0$ .

Початковий розподіл концентрації азоту  $f(x)$  в азотованому шарі сталі ШХ15 показано в табл. 1.

Таблиця 1

**Початковий розподіл концентрації азоту в азотованому шарі сталі ШХ15**

Віддаль від поверхні азотованого шару, в мкм	0	10	15	20	30	35	60
Вміст азоту, %	10	5,18	0,7	0,37	0,23	0,071	0,003

Для випадку  $\beta \gg D$  граничні умови (4) мають вигляд:

$$C(0, \tau) = C_0. \tag{4,a}$$

Коефіцієнт дифузії азоту в  $\varepsilon$ -фазі можна визначити за формулою:

$$D = 0,277 \exp \left[ \frac{35250}{R(t + 273)} \right], \tag{5}$$

де  $R$  – газова постійна ( $R = 8,31$  Дж/(моль. К)) [4].

Застосувавши до задачі (1-4) метод прямих, одержимо:

$$\frac{C_k - C_{k-1}}{h_\tau} = \frac{d}{dx} \left[ D_k(x) \frac{dC_k}{dx} \right]; \tag{6}$$

$$C_0(x) = f(x); \tag{7}$$

$$C_k(l) = 0; \tag{8}$$

$$-D(0) \frac{dC_k(0)}{dx} = \beta [C^* - C_k(0)]. \tag{9}$$

Перетворимо вираз (6), прийнявши:

$$C_k = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \tag{10}$$

Тоді:

$$\frac{dC_k}{dx} = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2, \tag{11}$$

$$\frac{d^2C_k}{dx^2} = 2a_2 + 6a_3x. \tag{12}$$

Підставивши (10-12) в рівняння (6) і граничні умови (2) та (3), застосувавши метод колокацій, отримаємо систему рівнянь 4-го порядку:

$$a_0 + a_1l + a_2l^2 + a_3l^3 = 0, \tag{13}$$

$$a_0\beta + a_1D_k(0) = \beta C^*; \tag{14}$$

$$-\frac{a_0}{h_\tau} + a_1 \left[ D'_k(x_i) - \frac{x_i}{h_\tau} \right] + a_2 \left[ 2D'_k(x_i)x_i + 2D_k(x_i) - \frac{x_i^2}{h_\tau} \right] + a_3 \left[ 6x_iD_k(x_i) + 3x_i^2D'_k(x_i) - \frac{x_i^3}{h_\tau} \right] = -\frac{1}{h_\tau} C_{k-1}(x_i), i = 1, 2. \tag{15}$$

Результати рішення системи рівнянь (13-15) на ЕОМ з урахуванням того, що температура не змінюється протягом 400 секунд, а початковий розподіл концентрації азоту в азотованому шарі показано в таблиці 1, наведені на рис. 1. З рисунка видно, що при термоактивуванні відбувається перерозподіл концентрації азоту в азотованому шарі в результаті його дифузії. З підвищенням температури зменшується концентрація азоту на поверхні та її збільшення по глибині. При цьому відбувається збільшення товщини азотованого шару та зменшення градієнт концентрації азоту по товщині, що зумовлює зміну фізико-механічних властивостей покриття.

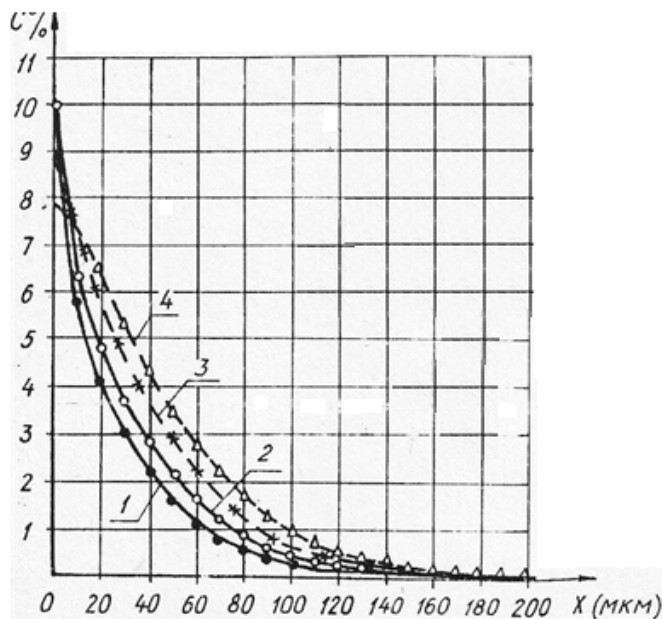


Рис. 1. Розподіл концентрації азоту по глибині азотованого шару сталі ШХ15 при витримці протягом 400 секунд за різних температур термоактивування: 1 – 540 °C; 2 – 600 °C; 3 – 700 °C; 4 – 780 °C

За наявності бар'єрних шарів на поверхні азотованого шару, якими можуть бути окисні плівки або інші заздалегідь нанесені бар'єрні покриття, азот, що утворився після розпаду нітридних фаз, в більшій кількості дифундує всередину зразка при існуючих градієнтах температур і концентрацій азоту. В результаті дифузії азоту його концентрація на поверхні істотно зменшується, що призводить до зниження твердості поверхневого шару. Особливо істотне зниження твердості поверхневого шару відбуватиметься в разі відсутності на поверхні бар'єрного шару, коли можлива дифузія азоту не тільки всередину металу, але і в навколишнє середовище.

**Методика експериментальних досліджень.** Зразки із сталі ШХ15 з шорсткістю поверхні  $Ra=0,125$  мкм азотувалися в плазмі тліючого розряду в безводневому середовищі за режимом (температура дифузійного насичення 580°C, тиск в вакуумній камері 240 Па, насичуюче середовище 75об.%N<sub>2</sub>+25 об.% Ar, час дифузійного насичення 480 хв), що забезпечив мікротвердість поверхні  $H100 = 9180$  МПа, товщину азотованого шару 350 мкм та фазовий склад на поверхні 55% Fe<sub>2</sub>-3N+45% Fe<sub>4</sub>N. Друга партія зразків цієї сталі після азотування піддавалася іонному оксидуванню в тій же камері в середовищі суміші 50 об.% кисню і 50об.% повітря на протязі 60 хв. за попереднім режимом. В результаті на поверхні азотованого шару одержано оксидний шар товщиною 2,5 мкм з мікротвердістю поверхні 6140 МПа і фазовим складом 80% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + 20% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (магнетит+гематит). Зразки з азотованим шаром та оксидним шаром на поверхні азотованого шару піддавалися термоактивуванню в середовищі аргону при температурі нагріву 850°C з різними витримками 5, 7, 10 і 25 хв при цій температурі. Методами металографії визначалися структура, товщина і мікротвердість по товщині азотованого шару з використанням мікроскопів МІМ-9 і ПМТ-3. Фазовий склад на поверхні азотованих шарів визначали з використанням ДРОН-3М. Залишкові напруження в азотованих шарах при різних витримках під час термоактивування визначали за показниками мікротвердості за методикою [10].

**Результати експериментальних досліджень.** В табл. 2 наведені результати досліджень властивостей азотованих шарів сталі ШХ15 до і після термоактивування з різною витримкою. З таблиці видно, що при термоактивуванні характеристики азотованого шару змінюються в значних межах в залежності від часу витримки при даній температурі.

Зокрема, при збільшенні часу витримки зменшуються мікротвердість та залишкові напруження на поверхні, змінюється фазовий склад в результаті часткового розпаду нітридних фаз та переходу азоту, що звільнився, в твердий розчин, збільшується товщина азотованого шару. Наявність оксидної плівки на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище, що сприяє збільшенню дифузії азоту, що утворився при розпаді ε-фази, всередину металу. В результаті чого характеристики азотованих шарів з оксидною плівкою після термоактивування мають більші значення в порівнянні з азотованими шарами без оксидної плівки (табл. 2).

На рис. 2 і 3 наведені результати досліджень розподілу мікротвердості по товщині азотованих шарів до і після термоактивування сталі ШХ15 при різних витримках. З рисунків видно, що температура та час витримки при даній температурі мають великий вплив на розподіл мікротвердості по товщині азотованого шару. Термоактивування азотованих шарів при температурі 850°C приводить до розпаду нітридних фаз, при якому вищі фази переходять в нижчі з виділенням азоту. При відсутності оксидного шару на поверхні азотованого шару при термоактивуванні азот, що утворився після розпаду нітридних фаз, дифундує всередину металу і часткова разом з вуглецем в навколишнє середовище. В результаті зменшується

твердість поверхні та її перерозподіл по товщині і ти більше, чим більший час витримки при температурі термоактивування (рис. 2). При терміні витримки 25 хв мікротвердість поверхні зменшилася більше 2-х раз в порівнянні з витримкою 5 хв.

Таблиця 2

**Властивості азотованого шару після термоактивування**

№ п/п	Вид термообробки та технології	Твердість поверхні $H_{100}$ , МПа	Товщина покриття $h$ , мкм	Фазовий склад поверхні	Залишкові напруження, $\sigma_3$ , МПа
1	азотування, витримка 0 хв	9180	350	55% $Fe_{2-3}N$ +45% $Fe_4N$	629
2	азотування, витримка 5 хв	8300	357	15% $Fe_{2-3}N$ +85% $Fe_4N$	415
3	азотування, витримка 7 хв	7600	365	90% $Fe_4N$ + 10 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	330
4	азотування, витримка 10 хв	6500	370	50% $Fe_4N$ + 50 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	280
5	азотування, витримка 25 хв	4000	280	35% $Fe_4N$ + 65 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	210
6	оксиазотування витримка 5 хв	8800	362	20% $Fe_{2-3}N$ +80% $Fe_4N$	513
7	оксиазотування витримка 7 хв	8400	370	70% $Fe_4N$ +30 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	428
8	оксиазотування витримка 10 хв	7700	375	60% $Fe_4N$ + 40 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	336
9	оксиазотування витримка 25 хв	6250	386	48% $Fe_4N$ + 52 $\alpha$ - $Fe_{[N]}$ ,	275

Оксидна плівка на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище. Тому мікротвердість поверхні азотованих шарів при термоактивуванні значно вища в порівнянні з азотованими шарами без окисної плівки (рис. 3).

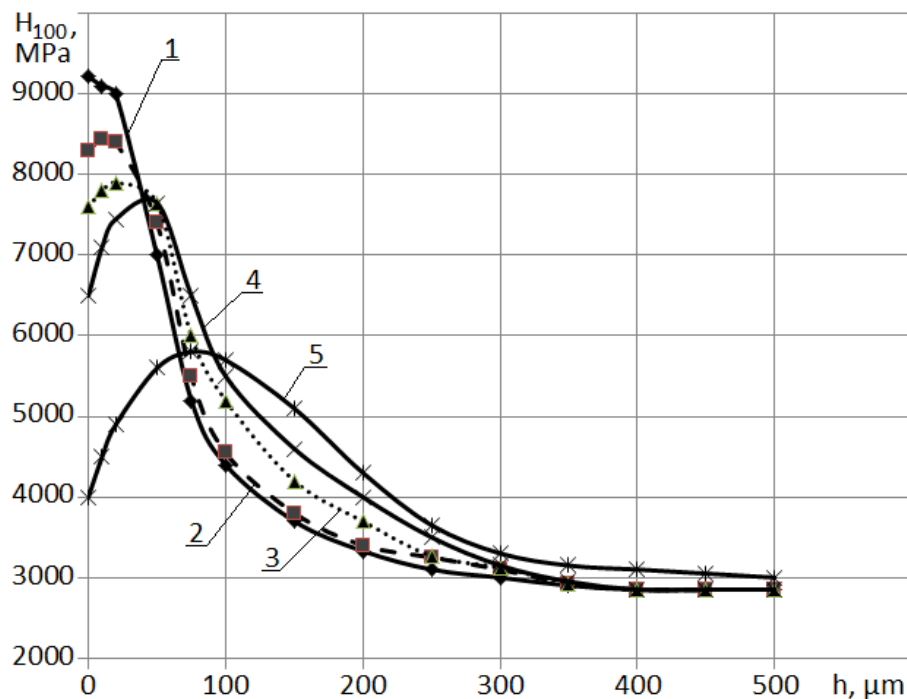


Рис. 2. Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару сталі ШХ15 після нагріву і витримці при температурі 850 °С в аргоні: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 10; 5 – 25 хв

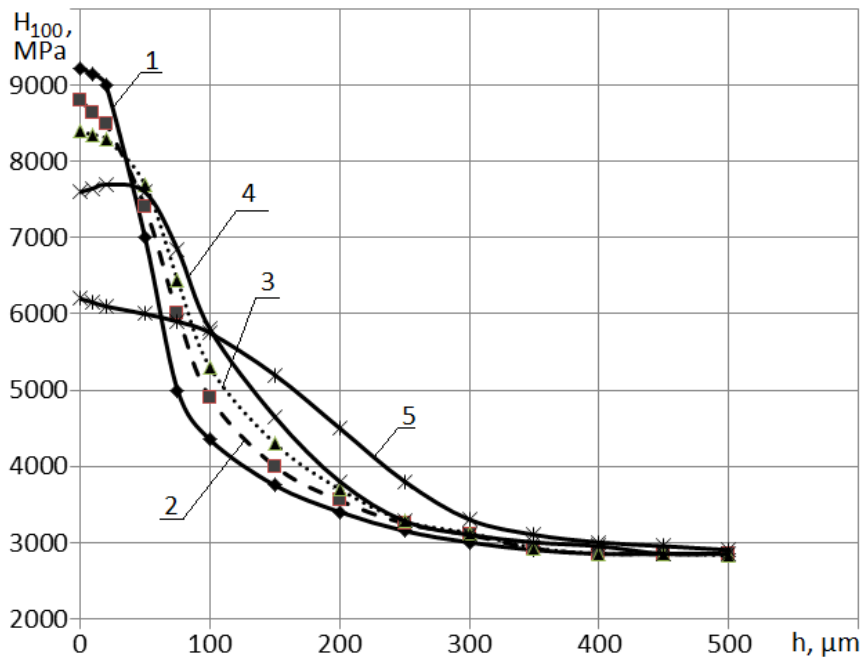


Рис. 3. Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару з оксидним шаром на поверхні сталі ШХ15 після нагріву і витримки при температурі 850 °С в аргоні: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 10; 5 – 25 хв

Термоактивування азотованих шарів має великий вплив на фазовий склад (табл. 2) азотованих шарів і структуру матеріалу. На рис. 4 наведена структура з азотованими шарами сталі ШХ15 після термоактивування з різними термінами витримки при температурі 850°С, які підтверджують даний висновок.

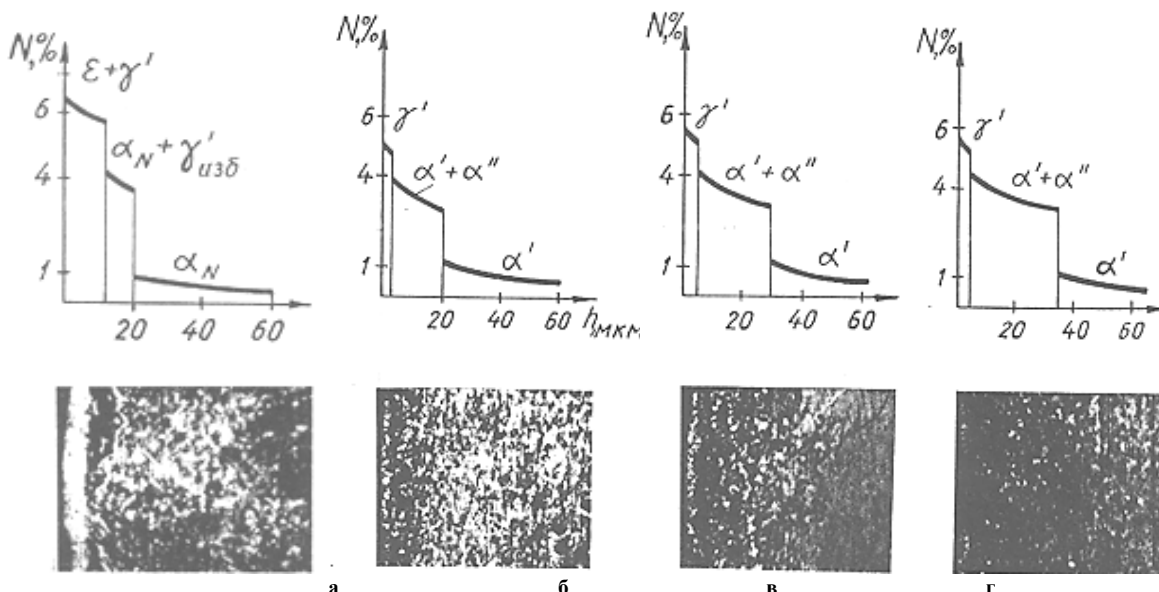


Рис. 4. Мікроструктура сталі ШХ15 до і після термоактивування азотованих шарів при температурі 850°С та різних термінах витримки при даній температурі: а – до термоактивування; б – 7 хв; в – 10 хв; г – 25 хв

**Висновки.** Термоактивування азотованих шарів має великий вплив на властивості азотованих шарів і змінює їх в значних межах.

При збільшенні часу витримки при температурі термоактивування зменшуються мікротвердість та залишкові напруження на поверхні, змінюється фазовий склад в результаті часткового розпаду нітридних фаз, збільшується товщина азотованого шару.

Наявність оксидної плівки на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище, що сприяє збільшенню дифузії азоту всередину металу, що утворився при розпаді нітридних фаз в процесі термоактивування. При цьому відсутній дефектний шар пониженої твердості а поверхні.

## Література

1. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.
2. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Б. Н. Арзамасов. – М. : Машиностроение, 1979. – 224 с.
3. Лахтин Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Metallurgiya, 1982. – 176 с.
4. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. – М. : Изд-во МГТУ им Н. 3. Баумана, 1999. – 400 с.
5. Каплун В.Г. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании в безводородных средах / В.Г. Каплун // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2003. – Т. 1. – № 2. – С. 141–146.
6. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун, П.В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
7. Kaplun P. V., Gonchar V. A. Low-Cycle Fatigue of Steels After Ion Nitriding in Hydrogen-Free Atmospheres / P. V. Kaplun, V. A. Gonchar // Materials Science. – November 2016. – Volume 52, Issue 3. – P. 402–406.
8. Каплун П.В. Контактна витривалість сталі 40Х в різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування / П.В. Каплун, О.В. Диха, В.А. Гончар // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів, 2017. – № 4. – С. 42–47.
9. Каплун П.В. Вплив водню на контактну витривалість сталей при іонному азотуванні / П.В. Каплун // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів, 2017. – № 6. – С. 68–72.
10. Каплун П. В., Ляшенко Б. А. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості / П. В. Каплун, Б. А. Ляшенко // Проблеми міцності. – 2016. – № 6. – С. 56–63.
11. Каплун П. В. Підвищення зносостійкості підшипників кочення : монографія / П. В. Каплун, К. А. Паршенко. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 237 с.

## References

1. Lakhtin Yu. M. Azotirovanie stali / Yu. M. Lakhtin, Ia. D. Kogan. – M. : Mashinostroenie, 1976. – 256 s.
2. Arzamasov B. N. Khimiko-termicheskaiia obrabotka metallov v aktivizirovannykh gazovykh sredakh / B. N. Arzamasov. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 224 s.
3. Lakhtin Yu. M. Struktura i prochnost azotirovannykh splavov / Yu. M. Lakhtin, Ia. D. Kogan. – M. : Metallurgiiia, 1982. – 176 s.
4. Ionnaia khimiko-termicheskaiia obrabotka splavov / Arzamasov B. N., Bratukhin A. G., Eliseev Yu. S., Panaioti T. A. – M. : Izd-vo MGTU im N. 3. Baumana, 1999. – 400 s.
5. Kaplun V.G. Osobennosti formirovaniia diffuzionnykh sloev pri ionnom azotirovanii v bezvodородnykh sredakh / V.G. Kaplun // Fizicheskaiia inzheneriia poverkhnosti. – Kharkov, 2003. – T. 1. – № 2. – S. 141–146.
6. Kaplun V.G. Ionnoe azotirovanie v bezvodородnykh sredakh / V.G. Kaplun, P.V. Kaplun. – Khmelnitckii : KhNU, 2015. – 344 s.
7. Kaplun P. V., Gonchar V. A. Low-Cycle Fatigue of Steels After Ion Nitriding in Hydrogen-Free Atmospheres / P. V. Kaplun, V. A. Gonchar // Materials Science. – November 2016. – Volume 52, Issue 3. – R. 402–406.
8. Kaplun P.V. Kontaktna vytryvalist stali 40Kh v riznykh seredovyschchakh pislia ionnoho azotuvannia ta nitrohartuvannia / P.V. Kaplun, O.V. Dykha, V.A. Honchar // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv, 2017. – № 4. – S. 42–47.
9. Kaplun P.V. Vplyv vodniu na kontaktnu vytryvalist staley pry ionnomu azotuvanni / P.V. Kaplun // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv, 2017. – № 6. – S. 68–72.
10. Kaplun P. V., Liashenko B. A. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannia za pokaznykamy mikrotverdosti / P. V. Kaplun, B. A. Liashenko // Problemy mitsnosti. – 2016. – № 6. – С. 56–63.
11. Kaplun P. V. Pidvyshchennia znosostiikosti pidshypnykiv kochennia : monohrafiia / P. V. Kaplun, K. A. Parshenko. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – 237 s.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 25.11.2018 р.

Рецензент:



С.М. БОЙКО, Ю.М. ШМЕЛЕВ, Е.Е. ВОЛКАНИН, О.М. БОРИСЕНКО

Кременчуцкий летный колледж Национального авиационного университета

С.Я. ВИШНЕВСКИЙ

Винницкий национальный технический университет

## ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА

*Исходя из того, что за последние десятилетия количество аварий вертолетов составило не один десяток, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы генератора. В настоящее время проблемой диагностики авиационной техники в Украине занимаются ученые из Национального авиационного университета, основные работы которых состоят в оптимизации процессов ее технического обслуживания с помощью информационно-управляющих систем [1–4]. Однако в их работах вопросы исследования процессов авиационных генераторов рассматриваются поверхностно, при этом, учет их изменения состояния может существенно повлиять на повышение качества диагностики авиационной техники. Таким образом, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы генератора вертолета. Цель исследования – разработка математической модели исследования основных режимов работы авиационного генератора вертолета при его эксплуатации в реальных режимах работы, то есть определение времени переходов из одного режима работы генератора в другой во всех возможных вариантах, что позволит разработать информационно-управляющую систему диагностики и прогнозирования состояния генератора вертолета. Проведён анализ особенностей эксплуатации и возможных режимов работы авиационного генератора вертолётa. Обоснована необходимость применения марковского процесса для контроля состояния авиационных генераторов. Разработана и предложена для дальнейшей реализации математическая модель определения и описания состояния авиационных генераторов. Полученные уравнения описания отказа одного из генераторов показывают, что значение  $\phi$  зависит от интенсивности появления события  $\lambda$ , несмотря на тип процесса, что позволит применить стандартные методы построения алгоритма определения непрерывного марковского процесса при имитации работы генератора вертолета.*

*Ключевые слова:* система контроля состояния, авиационный генератор вертолётa.

S.M. BOIKO, Y.M. SHMELYOV, E.E. VOLKANIN, O.M. BORYSENKO

Kremenchuk Flight College of the National Aviation University

S.YA. VISHNEVSKIY

Vinnytsia National Technical University

## APPLICATION OF THE EQUATIONS OF THE MARKOV PROCESS IN DIAGNOSTICS OF THE STATE OF AVIATION GENERATOR

*According to the fact that over the past decades, the number of helicopter crashes was not more than one dozen, the actual scientific and practical task is to diagnose and predict changes in the state of the generator. Nowadays, scientists from the National Aviation University are engaged in diagnostics of aviation equipment in Ukraine, whose main work is to optimize its maintenance processes with the help of information and control systems [1-4]. However, in their work, the issues of studying the processes of aviation generators are considered superficially, while taking into account their state changes can significantly affect the improvement of the quality of diagnostics of aviation equipment. Thus, the actual scientific and practical task is to diagnose and predict changes in the state of operation of the helicopters generator. The purpose of the study is to develop a mathematical model for studying the main modes of operation of the helicopter aircraft generator during its operation in real operating modes, that is, determining the time of transitions from one mode of operation of the generator to another of all possible variants, which will allow us to develop an information management system for diagnosing and forecasting the state of the generator helicopter shaft. An analysis of the operational features and possible operating modes of the aircraft helicopter generator was conducted. The necessity of application of the Markov's process for control of the state of aviation generators was substantiated. A mathematical model for determining and describing the condition of aviation generators has been developed and proposed for further realization. The resulting equations of the failure description of one of the generators show that the value of  $\phi$  depends on the intensity of the occurrence of the event  $\lambda$ , despite the type of process, which will allow the application of standard methods for constructing an algorithm for determining the continuous Markov process in simulating the operation of the helicopter generator.*

*Keywords:* state control system, aircraft generator helicopter.

### Изложение основного материала

Учитывая тот факт, что вертолет может иметь два генератора, считается, что вертолет – система, имеющая надежную работу ( $P \geq 0,9$ ), которая состоит из  $i$  единиц генераторов. Пусть случайное время работы одного генератора имеет положительное распределение вероятности и не зависит от состояния других единиц генератора [4, 5]. В более общей математической модели работы системы, состоящей из  $i$  единиц, в которой учитывается взаимосвязь между единицами генераторов, можно считать [5], что показательное распределение имеет случайное время  $t_i$  совместной работы к выходу из строя одного из имеющихся единиц генераторов, то есть:

$$P\{\tau_i \leq t\} = 1 - e^{-\phi t}, \quad (1)$$

где  $\phi_0 = 0$ ,  $\phi_i > 0$  при  $i = 1, 2, \dots$

Пусть в общем случае  $P_{ij(t)}$  – вероятность наличия в момент времени  $t$  работоспособных  $j$  единиц генераторов, при условии, что в начальный момент времени  $t = 0$  было  $i$  единиц работоспособных генераторов. Первым шагом задачи диагностики и прогнозирования вероятности отказа одного из генераторов вертолета является получение уравнения для переходных вероятностей отказа одного из генераторов вертолета.

Разрабатываемой математической моделью является марковский процесс отказа одного из генераторов вертолета  $\xi_t, t \in [0, \infty)$  на множестве состояний  $N = 0, 1, 2, \dots$ , в котором переходные вероятности  $P_{ij}(t) = P\{\xi_t = j | \xi_0 = i\}, i, j \in N$  представлены при  $t \rightarrow 0+$  в виде [5]:

$$P_{i,i-1}(t) = \varphi_i t + o(t); \tag{2}$$

$$P_{ii}(t) = 1 - \varphi_i t + o(t). \tag{3}$$

Скачки процесса простого изменения состояний работы генератора  $\xi_t$  представлены на рис. 1. Пусть при  $t = 0$  процесс находится в начальном состоянии  $i$ . В момент времени  $\tau_i P\{\tau_i \leq t\} = 1 - e^{-\varphi_i t}$  происходит переход процесса в состояние  $i - 1$  и так далее.

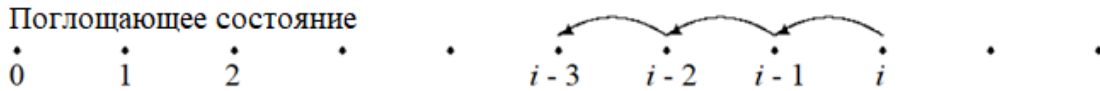


Рис. 1. График изменения состояния генератора вертолета

Первая (обратная) система дифференциальных уравнений Колмогорова для переходных вероятностей в случае процесса перехода генератора вертолета из одного состояния в другое имеет вид [5]:

$$\frac{dP_{oj}(t)}{dt} = -\varphi_0 P_{oj}(t); \tag{4}$$

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \varphi_i P_{i-1,j}(t) - \varphi_i P_{ij}(t), \tag{5}$$

где  $i = 1, 2, \dots$  с начальными условиями  $P_{ii}(0) = 1, P_{ij}(0) = 0$  при  $i \neq j$ .

Применив оператор обобщенной производной [5], определенный на аналитических в окрестности нуля функциях, получим:

$$f(s) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j s^j; \tag{6}$$

$$D_s(f) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j \varphi_j s^{j-1}. \tag{7}$$

Свертывая систему с помощью производящей функции переходных вероятностей

$$G_j(t; z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} P_{ij}(t); \tag{8}$$

при  $i \in N$ , имеем цепочку равенств в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dG_j}{dt} &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{i-1,j}(t)}{dt} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \\ &= z \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^{i-1}}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{i-1,j}(t)}{dt} - z \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^{i-1}}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = zG_j - zD_z(G_j) = z(1 - D_z)G_j. \end{aligned} \tag{9}$$

Таким образом, первая система дифференциальных уравнений получает вид:

$$\frac{dG_j(t; z)}{dt} = z(1 - D_z)G_j(t; z) \tag{10}$$

с начальным условием  $G_j(0; z) = \frac{z^j}{\varphi_1 \dots \varphi_j}$ .

Вторая (прямая) система дифференциальных уравнений Колмогорова для переходных вероятностей в случае изменения состояния работы генератора вертолета имеет вид [5]:

$$\frac{dP_{i0}(t)}{dt} = -P_{i0}(t)\varphi_0 + P_{i1}(t)\varphi_1; \tag{11}$$

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = -P_{ij}(t)\varphi_j + P_{ij+1}(t)\varphi_{j+1}, \tag{12}$$

где  $j = 1, 2, \dots$  с начальными условиями  $P_{ii}(0) = 1, P_{ij}(0) = 0$  при  $i \neq j$ .

Свертывая систему с помощью производящей функции переходных вероятностей

$$F_i(t; s) = \sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t) s^j \tag{13}$$

при  $j \in N, |s| \leq 1$ , имеем цепочку равенств в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dt} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} s^j = -\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t) \varphi_j s^j + \sum_{j=0}^{\infty} P_{i,j+1}(t) \varphi_{j+1} s^j = -s \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij}(t) \varphi_j s^{j-1} + \\ + \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij}(t) \varphi_j s^{j-1} = -s D_s (F_i) + D_s (F_i) = -(s+1) D_s (F_i). \end{aligned} \quad (14)$$

Вторая система дифференциальных уравнений получает вид:

$$\frac{dF_i}{dt} = -(s+1) D_s (F_i) \quad (15)$$

с начальным условием  $F_i(0; s) = s^i$ .

Соответственно, двойная производящая функция

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} F_i(t; s) = \sum_{i,j=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} P_{ij}(t) s^j = \sum_{i,j=0}^{\infty} G_j(t; z) s^j \quad (16)$$

удовлетворяет уравнениям:

$$\frac{dF}{dt} = z(1 - D_z) F; \quad (17)$$

$$\frac{dF}{dt} = (1-s) D_s (F) \quad (18)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e(zs)$ .

Функция  $e(z)$ , определенная равенством [6]

$$e(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i}, \quad (19)$$

является собственной функцией оператора обобщенной производной  $D_z$ , то есть:

$$D_z (e(z)) = e(z). \quad (20)$$

Применим известные выражения переходных вероятностей [5] для математического описания процесса полного отказа генератора вертолета:

$$P_{ij}(t) = \varphi_1 \dots \varphi_{j+1} \sum_{n=j}^i \frac{e^{-\varphi_n t}}{(\varphi_1 - \varphi_n)(\varphi_{n+1} - \varphi_n)(\varphi_{n-1} - \varphi_n) \dots (\varphi_j - \varphi_n)} \quad (21)$$

при  $j < i$ , применив которые легко получить решения уравнений (17) и (18) в виде ряда с разделенными переменными:

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\varphi_1 \dots \varphi_i} \overline{C}_n(z) C_n(s) e^{-\varphi_n t}, \quad (22)$$

где

$$\overline{C}_n(z) = z^n + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^{n+k}}{(\varphi_{n+1} - \varphi_n) \dots (\varphi_{n+k} - \varphi_n)}; \quad (23)$$

$$C_n(s) = s^n + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\varphi_{k+1} \dots \varphi_n}{(\varphi_k - \varphi_n) \dots (\varphi_{n-1} - \varphi_n)}. \quad (24)$$

При  $\varphi_{i+1} > \varphi_i, i \in N$ , и  $\lim_{i \rightarrow \infty} \varphi_i = \infty$  ряд (22) абсолютно сходится при любых значениях  $z, |s| < 1$  и  $t \in [0, \infty)$ . При  $t = 0$  получаем разложение обобщенной экспоненты:

$$e(zs) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\varphi_1 \dots \varphi_n} \overline{C}_n(z) C_n(s). \quad (25)$$

Для процесса отказа генератора как функции линейного типа, когда  $(\lambda > 0)$ , то есть  $\varphi_i = i\lambda$ , оператор обобщенной производной совпадает с обычной производной и имеет вид:

$$D_z \lambda = \frac{d}{ds}. \quad (26)$$

В результате уравнения (17) и (18) принимают вид:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z \left( 1 - \frac{d^2 F}{dz^2} \right); \quad (27)$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda (1-s) \frac{dF}{ds} \quad (28)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ . Тогда выражения (22) и (25) принимают вид:

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{\lambda}\right)^n}{n!} e^{\frac{z}{\lambda}} (s-1)^n e^{-n\lambda t}; \tag{29}$$

$$e(zs) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} e^z (s-1)^n. \tag{30}$$

Суммируя ряд (29), приходим к замкнутому выражению для двойной производящей функции

$$F(t; z; s) = e^{\frac{z}{\lambda}(1+(s-1)e^{-\lambda t})}. \tag{31}$$

Отсюда из определения  $F(t; z, s)$  получаем:

$$F_i(t; s) = \left(1 - e^{-\lambda t} + se^{-\lambda t}\right)^i \tag{32}$$

при  $i \in N$ .

Соотношение (32) означает, что случайные времена работы каждого из имеющихся  $i$  единиц генераторов не зависят друг от друга; такое свойство независимости имеет место только для процесса линейного типа.

Для приложений в математической теории надежности [4, 5] представляет интерес нахождение аналогичного (32) замкнутого интегрального представления для производящей функции  $F_i(t; s)$ , как решения уравнений Колмогорова (17) и (18) для процесса отказа одного из генераторов (путем суммирования ряда Фурье (22), при частных предположениях о функции  $\varphi_i = \varphi(i)$  [7–9].

В случае процесса квадратичного типа полагается, что

$$\varphi_i = i(i-1)\lambda. \tag{33}$$

Тогда при

$$D_s = \lambda s \frac{d^2}{ds^2} \tag{34}$$

имеем систему уравнений:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z^2 \left( \frac{dF}{dz} - \frac{d^2 F}{dz^2} \right); \tag{35}$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda (s - s^2) \frac{d^2 F}{ds^2} \tag{36}$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ .

В случае процесса полиномиального типа полагают

$$\varphi_i = i(i-1)\dots(i-k+1)\lambda; \tag{37}$$

где  $k = 3, 4, \dots$

Тогда

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z^k \left( \frac{d^{k-1} F}{dz^{k-1}} - \frac{d^k F}{dz^k} \right), \tag{38}$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda (s^{k-1} - s^k) \frac{d^k F}{ds^k} \tag{39}$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ .

Замечание. Поскольку вертолет может иметь два генератора, то процесс полиномиального типа сводится процессу квадратичного типа вследствие того, что показатель степени  $k$  может принимать лишь значение 2 [5].

В случае процесса степенного типа полагается, что:

$$\varphi_i = i^\rho \lambda; \tag{40}$$

где  $0 < \rho < 1$ .

В случае процесса пуассоновского типа полагается, что

$$\varphi_0 = 0; \varphi_i = \lambda; \tag{41}$$

где  $i = 1, 2, \dots$

тогда

$$D_s(f) = \lambda \frac{f(s) - f(0)}{s}. \tag{42}$$

### Выводы и предложения

Таким образом, полученные уравнения описания отказа одного из генераторов показывают, что значение  $\varphi_i$  зависит от интенсивности появления события  $\lambda$ , несмотря на тип процесса (квадратичный, полиномиальный, степенной или пуассоновский), что позволит применить стандартные методы построения алгоритма определения непрерывного марковского процесса при имитации работы генератора вертолета.

## Література

1. Інформаційні технології забезпечення конструктивно-експлуатаційних властивостей повітряних суден та авіаційних двигунів / С. О. Дмитрієв, О. В. Попов, Д. В. Попов, Г. О. Арістов // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 67–72.
2. Формалізація процедур та визначення оптимальних програм технічного обслуговування повітряних суден та авіаційних двигунів / С. О. Дмитрієв, В. І. Бурлаков, О. В. Попов, Д. В. Попов // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2014. – № 9 (116). – С. 177–181.
3. Деревянко И. Г. Конструкция и эксплуатация вертолета Ми-8МТВ-1 / И. Г. Деревянко. – Кременчуг : КЛК НАУ, 2011. – 142 с.
4. Острейковский В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М. : Абрис, 2012. – 463 с.
5. Тимонин В. И. Точные распределения статистик типа Колмогорова-Смирнова, применяемых для анализа остаточной надежности резервированных систем / В. И. Тимонин, М. А. Ермолаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Вып. 10. – С. 66–72.
6. Калинин А. В. Уравнения марковского процесса гибели в математической теории надежности [Электронный журнал] / А. В. Калинин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 14. – Режим доступа : <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1150.html>
7. Denisov Y. O. Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost / Y. O. Denisov, S. A. Stepenko, A. N. Gorodny, V. A. Kravchenko // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE. – 2014. – P. 393–397.
8. Denisov Y. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit / Y. Denisov, A. Gorodny, V. Gordienko, R. Yershov, S. Stepenko, O. Kostyrieva, A. Prokhorova // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE. – 2016. – P. 327–332.
9. Gorodniy O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / O. Gorodniy, V. Gordienko, S. Stepenko, S. Boyko, O. Sereda // Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – 2017. – P. 232–235.

## References

1. Dmitriev S.O., Popov O.V., Popov D.V., Aristov G.O. (2015). Informacijni tehnologiyi zabezpechennya konstruktyvno-eksploatacijnyh vlastyvostryah suden ta aviacijnyh dyvguniv [Information technologies for maintenance of structural and operational properties of flying ships and aviation engines]. *Vestnik dvigatelestroeniya - Herald of engine building*, 2, 67-72 [in Ukrainian].
2. Dmitriev S.O., Burlakov V.I., Popov O.V., Popov D.V. (2013). Formalizaciya procedur ta vyznachennya optymalnyh program tehničnogo obslugovuvannya povitryanyh suden ta aviacijnyh dyvguniv [Formalization of procedures and definition of optimal maintenance programs for aircraft and aviation engines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologii - Aerospace Engineering and Technology*, 9 (116), 177-181 [in Ukrainian].
3. Derevianko I.G. (2011). *Konstruksiya i ekspluatatsiya vertoleta Mi-8MTV-1 [The design and operation of the Mi-8MTV-1 helicopter]*. Kremenchug: KLC NAU [in Russian].
4. Ostreikovskii V.A. (2012). *Teoriya nadezhnosti [Theory of reliability]*. Moscow: Arbis [in Russian].
5. Timonin V.I., Ermolaeva M.A. (2012). Tochnye raspredeleniya statistik tipa Kolmogorova-Smirnova, primenyemyih dlya analiza ostatochnoy nadezhnosti rezervirovannyh sistem [Exact distributions of Kolmogorov-Smirnov statistics used to analyze the residual reliability of redundant systems]. *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy - Electromagnetic waves and electronic systems*, 10, 67-72 [in Russian].
6. Kalinkin A.V. (2013). *Uraveniya markovskogo protsessa gibeli v matematicheskoj teorii nadezhnosti [Equations of the Markov process of decay in the mathematical theory of reliability]*. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Retrieved from: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1150.html>.
7. Denisov Y. O., Stepenko S. A., Gorodny A. N., Kravchenko V. A. (2014). *Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost*, International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE.
8. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. (2016). *Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit*, International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE.
9. Gorodniy O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. (2017). *Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies*, Modern Electrical and Energy Systems (MEES).

Рецензія/Peer review : 15.10.2018 р.

Надрукована/Printed :21.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Сінчук О.М.

В.П. РОЙЗМАН, І.І. КОВТУН, Б.О. ЖУХОРОВ  
Хмельницький національний університет

## ОЦІНКА ВІБРАЦІЙ В КОНСТРУКЦІЯХ БЛОКІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Механічна дія вібрацій та ударів викликає від 30 до 50%, а в авіації до 80% всіх відмов виробів радіоелектроніки, погіршує точність та інші параметри апаратури. Метою представленої дослідження є розробка методів оцінки передачі вібрацій, що виникають в конструкціях радіоелектронної апаратури під дією зовнішнього динамічного навантаження. В статті представлена одно-масова модель коливальної системи. Проведено вібраційні дослідження конструкцій блоків радіоелектронної апаратури. Для визначення форми та вузлів коливальних об'єднувальних плат використано метод Гука-Хладні. Розроблено хрестоподібне пристосування, призначене для вібраційного випробування плат в різних положеннях кріплення. Отримані амплітудно-частотні характеристики об'єднувальних плат встановлених в різних положеннях кріплення при вібраційному випробуванні. В статті теоретично та експериментально показано що амплітуди коливальних блоків радіоелектронної апаратури та його компонентів можуть відрізнятися і значно перевищувати амплітуду зовнішнього динамічного навантаження.

Ключові слова: вібрація, динаміка, коливальна система, резонанс, об'єднувальна плата, вібростенд.

V.P. ROYZMAN, I.I. KOVTUN, B.O. ZHUHOROV  
Khmelnitskyi National University

## ESTIMATION OF VIBRATION IN STRUCTURES OF ELECTRONIC UNITS EXPOSED TO EXTERNAL DYNAMIC FORCES

Mechanical forces introduced by vibration and shocks cause from 30 to 50%, and even 80% in aviation, of all failures in electronic units, which are likely to be fatal or provoke deviation in precision of their parameters. The research represented in the paper is aimed at evaluating vibration transmission that undergoes in electronic units exposed to external dynamic forces. The paper demonstrates that vibration sustained by electronic packages while their operation or tests cannot be characterized by vibration parameters measured either on their supporting base or on the shaker transmitting this vibration. The theoretical model of the single-mass oscillation system representing electronic package is introduced. The important issue was made that if the mass connection to the source of vibration is not absolutely rigid then the amplitudes of the source vibration and of the mass may significantly differ. The experimental measurement of vibration conducted inside the enclosure of electronic package verified significant difference in amplitude of vibrations transmitted inside the package and external source vibrations. The paper also represents identification of natural frequency and forms of oscillation for the main construction elements of the electronic packages such as printed circuit boards, subjected to vibration. The significant attention was paid to the experimental research of dynamic characteristics conducted by using experimental setup that consists of the shaker with vibration test cross appliance, which provided vibration tests of the boards mounted in different positions. Using Hook and Chladni method identified the complexity of oscillation forms and detected location of the oscillation nodes, which represent highest strain and stress of the board. Analysis of amplitude frequency response, obtained for the tested boards populated with electronic components, indicates necessity to consider the installation position of the boards inside the electronic package and electronic components layout.

Keywords: vibration, dynamics, oscillation system, resonance, printed circuit board, shaker.

### Постановка проблеми

Функціональні монтажні плати, днища шасі, стінки корпусів і деякі інші конструктивні елементи виробів радіоелектронної апаратури (РЕА) в експлуатаційних умовах не тільки самі можуть перебувати під впливом вібраційних і ударних навантажень, але і передавати ці навантаження на змонтовані на них блоки, об'єднувальні плати та електронні компоненти.

Якщо плати та інші несучі елементи відчувають резонансні коливання [1, 2, 3], то ці динамічні навантаження зростають багаторазово і можуть привести до поломок або відмов РЕА через відхилення параметрів розташованих на них блоків і елементів за допустимі межі технічних умов. Тому особлива увага повинна бути приділена знаходженню власних частот коливальних розрахунковими і експериментальними методами, а, отже, і можливих резонансів, щоб уникати роботи апаратури на цих режимах.

В залежності від умов експлуатації електронна техніка піддається впливу різних за спектром та інтенсивністю вібрацій та ударів. Такий вплив стає високо-ймовірним при встановленні електронних модулів на рухомих об'єктах – транспортних засобах (табл. 1).

Таблиця 1

### Узагальнені характеристики вібрацій, що діють на апаратуру, встановлену на рухомих об'єктах

Умови транспортування	Частота коливальних збудження, Гц	Прискорення, g	Амплітуда, мм	
			низькі частоти	високі частоти
Автомобіль	2–3	3	180	80
	15–40	1	1,1	0,15
Залізна дорога	2	±1,5	25	–
	100	±2	–	0,05
Водний транспорт	1–50	0,4–2	До 10	≤0,2
Повітряний транспорт	3–500	0,2–20	>3	≤0,2

Механічна дія вібрацій та ударів викликає від 30 до 50%, а в авіації до 80% всіх відмов виробів радіоелектроніки, погіршує точність та інші параметри апаратури. При цьому надійність всього виробу в цілому, його безвідмовність в роботі багато в чому визначається надійністю складових її компонентів, в той самий час коли число компонентів в радіоелектронній апаратурі за кожні 5 років збільшується в 2–5 разів. Тому важливо знати навантаження, в даному випадку динамічне, яке надходить – передається із зовні через корпус блоку РЕА на змонтовані в ньому компоненти. Метою представленого дослідження є розробка методів оцінки передачі вібрацій, що виникають в конструкціях РЕА під дією зовнішнього динамічного навантаження.

### Теоретична модель коливальної системи

Практика випробувань виробів на вібрації, а також експлуатації на віброуючих основах, показує, що вібрації столу (платформи) вібростенда в загальному випадку не характеризують ні вібрацій перехідних кріпильних пристосувань, ні тим більше вібрацій деталей і елементів структурно-складного виробу РЕА.

На рис. 1 схематично представлена модель коливальної системи на прикладі столу вібростенда з укріпленням на ньому виробом загальною масою  $m$ . Кріплення виробу до столу не є абсолютно жорстким, тому в схемі загальна маса  $m$  спирається на стіл вібростенда через пружини з коефіцієнтом жорсткості  $k$  і демпфер з коефіцієнтом згасання  $c$ . Рухомий стіл вібростенда здійснює гармонійні коливання з амплітудою  $z_0$  за законом  $z_0 \sin \Omega t$ .

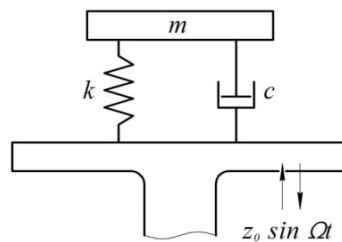


Рис. 1. Модель коливальної системи

Позначимо через  $z$  вертикальне переміщення маси у напрямку вниз. Тоді, через переміщення столу вібростенда вниз на величину  $z_0 \sin \Omega t$ , подовження пружини в який-небудь момент часу буде  $z - z_0 \sin \Omega t$ . Сила пружності пружини буде дорівнювати  $-k(z - z_0 \sin \Omega t)$ , а сила згасання, пропорційна швидкості, буде дорівнювати  $-c(z' - z_0 \Omega \cos \Omega t)$ . Тоді на основі другого закону Ньютона рівняння коливань системи буде:

$$mz'' + cz' + kz = kz_0 \sin \Omega t + cz_0 \Omega \cos \Omega t \quad (1)$$

Щоб знайти рух маси  $m$  відносно стола вібростенда візьмемо похідні від подовження пружини, прийнявши, що маса  $m$  перемістилася в цей момент разом з пружиною на  $z_1 = z - z_0 \sin \Omega t$  або  $z = z_1 + z_0 \sin \Omega t$ .

Диференціюючи, знаходимо:

$$z' = z_1' + z_0 \Omega \cos \Omega t, \quad z'' = z_1'' - z_0 \Omega^2 \sin \Omega t \quad (2)$$

Підставивши тепер вирази (2) в рівняння (1) знайдемо:

$$mz_1'' + cz_1' + kz_1 = mz_0 \Omega^2 \sin \Omega t \quad (3)$$

У цьому рівнянні  $mz_1''$  – сила інерції маси  $m$ ;  $cz_1'$  – сила демпфування;  $kz_1$  – сила пружності пружини;  $mz_0 \Omega^2$  – інерційна сила збурення. Таке представлення коливань називається інерційним [4].

Таким чином, ми отримали, що рух маси  $m$  (виробів РЕА разом з кріпильним пристосуванням) відносно віброуючої основи (столу вібростенда) відбувається так само як абсолютний рух маси  $m$  при нерухомій основі (столі вібростенда), коли на масу діє гармонійна сила збурення з амплітудою  $mz_0 \Omega^2$ .

Відзначимо, що амплітуда і фаза таких коливань залежать від близькості частоти  $\Omega$  збуджувальної сили до циклічної частоти  $\omega_c$  власних коливань маси.

Формула для коливань маси  $m$  на жорсткості  $k$  при  $c = 0$  має вид:

$$z = \frac{z_0 \sin \Omega t}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_c}\right)^2} \quad (4)$$

Звідси видно, що лише, коли  $\omega_c$  значно більше  $\Omega$ , маса  $m$  буде коливатися майже так само як основа, тобто стіл вібростенда. По мірі наближення  $\Omega$  до  $\omega_c$ , коливання маси будуть зростати, і відбуватися не в фазі. При  $\Omega = \omega_c$  настає резонанс. Після проходження резонансу, і в міру віддалення від нього, коливання маси будуть зменшуватися і прагнути до нуля.

Таким чином теоретично показано, що якщо маса  $m$  не закріплена на столі вібростенда абсолютно жорстко, то коливання столу, тобто зовнішні коливання, можуть не збігатися з коливаннями маси. Зрозуміло, що і елементи конструкції корпусу і друковані плати мають свої резонанси і підвищені на них вібрації. Нарешті, і електронні компоненти можуть мати свої резонанси і підвищені на них вібрації, які передаються на них через місця кріплення електронних компонентів до плати. У цій багато-масовій

коливальній системі кожен елемент виступає і як маса, і як жорсткість, і як збудник і як згашувач коливань, причому зі збільшенням амплітуди коливань в них можуть втягуватися сусідні деталі та елементи, змінюючи, таким чином, параметри коливальної системи: масу, жорсткість, демпфірування, що ще більш ускладнює оцінку передачі вібрацій.

**Передача вібрацій у блоках радіоелектронної апаратури при вібродослідженні**

В даному пункті представлені результати експериментального дослідження – вібрографування блоку РЕА, в якому мали місце руйнування при проведенні типових заводських випробувань. З цією метою на його поверхні, в тому числі і місцях руйнування елементів і вузлів, було встановлено п'ять вібродатчиків, відповідно до схеми, показаної на рисунку 2. Один вібродатчик (датчик № 6 – не показаний на схемі) було встановлено на платформі вібростенда. Потім, відповідно до серійної технології випробувань, за допомогою 4-х шпильок з різьбою М10 і двох швелерів, виріб встановили на монтажній плиті, яка, в свою чергу, кріпилася до платформи вібростенда двома болтами М10 (рис. 2, б). При чому, за серійною технологією, контроль затягування болтів не передбачався.

Експеримент проводився наступним чином. Відповідно до технічних умов (ТУ) виріб піддавався вібровипробуванням методом фіксованих частот. Віброустановкою задавався відповідний до ТУ режим, тобто частота і амплітуда коливань.

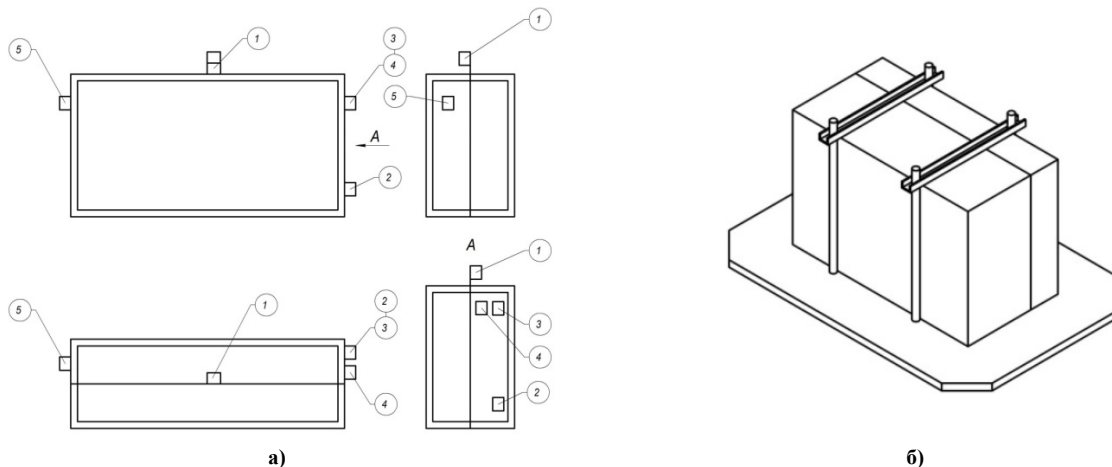


Рис. 2. Схема установки вібродатчиків № 1-5 на блоці РЕА (а) та блоку на монтажному пристосуванні (б)

Вібродатчики були включені в ланцюг вібровимірювальної апаратури. Контроль за правильністю (фіксованих) частот коливань, що задаються, здійснювався за допомогою звукового генератора. Крім цього, для виявлення резонансу окремих деталей, або блоку в цілому, в заданому по ТУ діапазоні частот, був застосований метод коливання частоти. Результати вимірювань, отримані на цих резонансних частотах при заданій незмінній амплітуді коливань вібростенда ( $A = 0,1 \text{ мм}$ ), наведені на рис. 3.

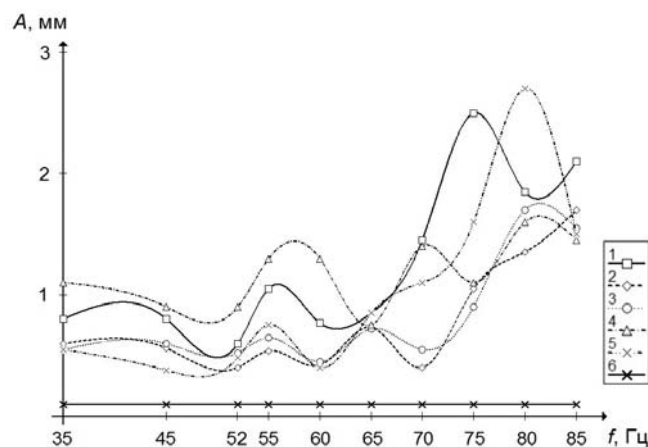


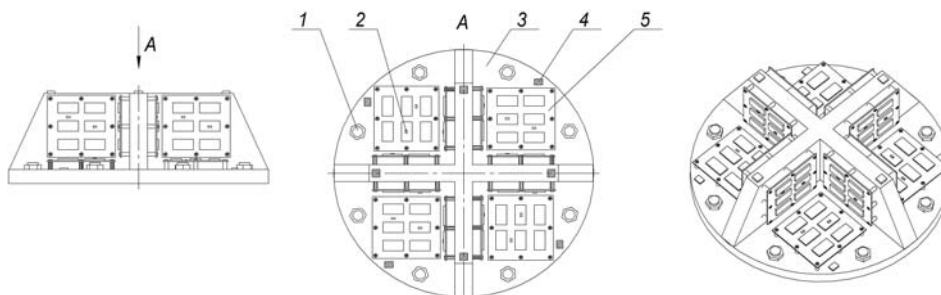
Рис. 3. Амплітудно-частотна характеристика коливань блоку РЕА зареєстрована вібродатчиками № 1-6

Аналізуючи матеріали вібрографування (рис. 3) визначено, що амплітуди коливань в місці установки вібродатчиків на блоці РЕА перевищували задані на столі вібростенду у 8–25 разів. Так, наприклад, при частоті коливань 80 Гц при заданій (по мікроскопу) амплітуді коливань  $A = 0,1 \text{ мм}$  дійсна амплітуда коливань виробу в місці установки вібродатчиків склала від 1,35 мм (датчик № 2) до 1,85 мм (датчик № 1) і 2,7 мм (датчик № 5). При випробуванні на частотах нижче 70 Гц це розходження було незначним.



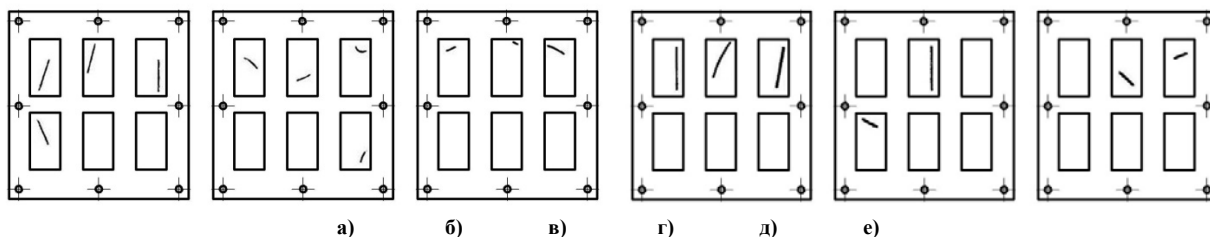
**Визначення форм і резонансних частот коливань вузлів електронних блоків**

В реальних конструкціях блоків РЕА друковані вузли можуть розташовуватися як в горизонтальному, так і вертикальному положеннях, що необхідно враховувати при їх дослідженні [5]. При проведенні експериментальних вібраційних випробувань було використано представлене на рис. 4 пристосування, яке дозволяє монтувати плати в різних положеннях та досліджувати до 12 плат одночасно. Випробування були проведені для плат з інсталюваними електронними модулями.



**Рис. 4.** Хресто-подібне пристосування для вібродослідження друкованих плат: 1 – болти кріплення; 2 – п’єзоелектричні кристали; 3 – основа монтажна; 4 – п’єзоелектричний перетворювач; 5 – об’єднувальна плата

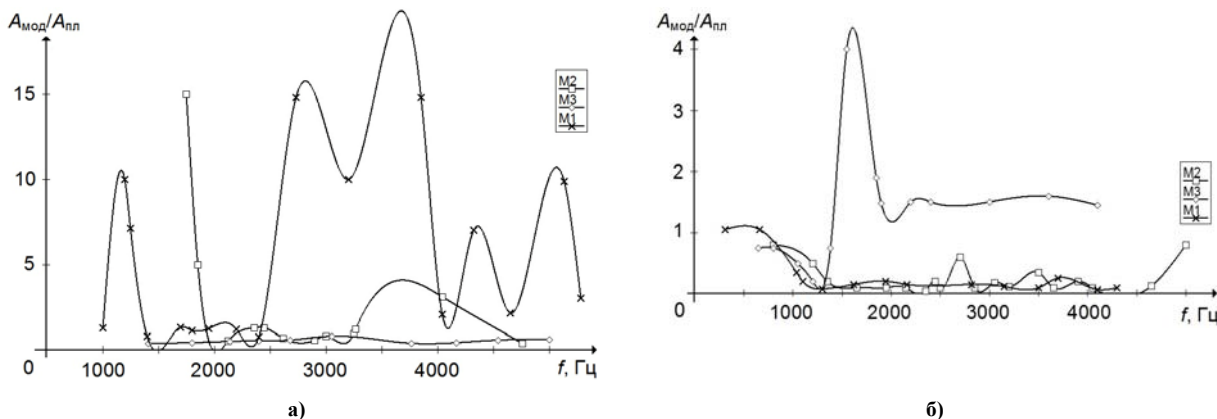
В ході експериментів визначалися власні частоти, форми і амплітуди коливань обраних друкованих плат в діапазоні частот коливань 2000-5000 Гц, який відповідає умовам експлуатації блоку РЕА на літаку. Для визначення форм коливань об’єднувальних плат було запропоновано використати метод Гука-Хладні [6]. Змочену гасом поверхню досліджуваних плат посипали дрібним кварцом. На резонансних частотах плат піщинки скидаються з місць пучностей коливань в місця, де плата не коливається, тобто в вузли коливань. У цих місцях виникають і найбільші напруження. Визначені таким способом форми коливань випробуваних плат показані на рис. 5.



**Рис. 5.** Форми коливань горизонтально розташованої об’єднувальної плати з інсталюваними модулями, на частотах коливань (Гц): а) 2580; б) 3373; в) 3501; та вертикально розташованої – на частотах коливань (Гц): г) 2798; д) 2354; е) 4107

Отримані фігури Хладні показують, що об’єкти дослідження мають складну форму коливань, що свідчить про складний деформований стан, як самих плат, так і встановлених на них електронних модулів.

Крім цього, отримані амплітудно-частотні характеристики (рис. 6), які були побудовані за середніми значеннями амплітуд коливань плат  $A_{пл}$  та електронних модулів  $A_{мод}$ . При визначенні амплітуд коливань модулів враховувалась нерівномірність розподілу віброперегрузок по поверхні рухомої платформи.



**Рис. 6.** Амплітудно-частотні характеристики коливань об’єднувальних плат при розташуванні: а) вертикально; б) горизонтально

Експериментальні амплітудно-частотні характеристики (рис. 6) свідчать про те, що найбільш чутливими до резонансних станів є об’єднувальні плати, встановлені вертикально, а найменш чутливими –

встановлені горизонтально. Це пояснюється тим, що залежно від того, як розташовані об'єднувальні плати – вертикально або горизонтально – пружні характеристики об'єктів дослідження будуть відрізнятися. Крім того, отримані експериментальні результати вказують на наявність густого спектру власних частот коливань плат, який залежить від конструкторських особливостей, встановлених на них електронних компонентів.

Отримані експериментальні дані свідчать про необхідність урахування розташування об'єднувальних плат, а також розташованих на них електронних компонентів, в конструкції електронного блоку, оскільки від цього залежить рівень амплітуд їх коливань.

#### Висновки

Представлена модель коливальної системи, дозволила теоретично показати, що якщо маса не закріплена на віброуючій основі абсолютно жорстко, то коливання основи, тобто зовнішні коливання, можуть не збігатися з коливаннями маси. В результаті вібраційного дослідження конструкції блоку радіоелектронної апаратури визначено, що вібрації об'єднувальних плат блоку внаслідок резонансного збудження перевершують вібрації, що діють на блок із зовні, чи передаються в місцях кріплення блоку. Застосування методу Гука-Хладні при вібраційному дослідженні об'єднувальних плат дозволили виявити складні форми коливань останніх та вузли коливань, в яких виникають найбільші деформації і напруження об'єктів дослідження. Розроблено хрестоподібне пристосування призначене для вібраційного випробування плат в різних положеннях кріплення. Аналіз амплітудно-частотних характеристик об'єднувальних плат, заповнених електронними компонентами, свідчить про необхідність врахування положення встановлення плат в електронному блоці та розподілу електронних компонентів на поверхні плат для вимірювання їх динамічних характеристик.

#### Література

1. T. Hamano, Y. Ueki, T. Nakasuji, K. Fujimoto. "Destruction mechanisms resulting from vibration load in PCB-mounted electronics", in ESPEC Technology Report No.17, 9th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Yokohama, Japan, 2003.
2. R.M. Jones. Buckling of Bars, Plates and Shells. Virginia, USA: Blacksburg, Bull Ridge Publishing, 2006.
3. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene, K. Pilkauskas. "Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components", MECHANIKA, vol. 22(6), pp. 489-494, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
4. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський. – К. : Вища школа, 1993. – 655 с.
5. G.S. Aglietti, and C. Schwingshackl "Analysis of Enclosures and Anti Vibration Devices for Electronic Equipment for Space Applications", School of Engineering Sciences, Aeronautics and Astronautics, University of Southampton, UK – 2010.
6. T. D. Rossing. "Chladni's law for vibrating plates." American Journal of Physics, vol. 50, issue 3, pp. 271–274, 1982. doi.org/10.1119/1.12866.

#### References

1. T. Hamano, Y. Ueki, T. Nakasuji, K. Fujimoto. "Destruction mechanisms resulting from vibration load in PCB-mounted electronics", in ESPEC Technology Report No.17, 9th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Yokohama, Japan, 2003.
2. R.M. Jones. Buckling of Bars, Plates and Shells. Virginia, USA: Blacksburg, Bull Ridge Publishing, 2006.
3. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene, K. Pilkauskas. "Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components", MECHANIKA, vol. 22(6), pp. 489-494, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
4. G.S. Pisarenko, V.A. Agarev. Strength of materials. Kiev: Technika, 1967, 792 p.
5. G.S. Aglietti, and C. Schwingshackl "Analysis of Enclosures and Anti Vibration Devices for Electronic Equipment for Space Applications", School of Engineering Sciences, Aeronautics and Astronautics, University of Southampton, UK – 2010.
6. T. D. Rossing. "Chladni's law for vibrating plates." American Journal of Physics, vol. 50, issue 3, pp. 271–274, 1982. doi.org/10.1119/1.12866.

Рецензія/Peer review : 15.10.2018 р.

Надрукована/Printed :21.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

YU. MALOGULKO, V. KHAVTYRKO, M. ZATKHAY  
Vinnytsia National Technical University

## IMPROVEMENT OF THE CLASSIFICATION SYSTEM FOR POWER TRANSFORMER DEFECTS

*The object of the study is power transformers, namely, their diagnostic systems, taking into account defects and emergency processes, when determining the state of the equipment. One of the most problematic places is the lack of study of operational problems that require the implementation of a set of preventive measures. Experience of operation of power transformers shows that after the normative term of service a large part of the transformers retains its ability under the conditions of adherence to acceptable load modes, timely repairs and their quality performance. The study used an integrated approach to solving the tasks, including world experience, synthesis of results and retrospectives, methods of technical diagnostics, theory of decision-making. In developing the classification of defects an attempt was made to exclude the deficiencies found in other approaches and proposed the diagnosis on the principle of «from general to specific». It is substantiated that the proposed advanced classification system of defects of power transformers, in which an attempt was made to eliminate the defects found in other approaches, allows to divide the abnormal processes that cause the defect, and the structural elements of the transformer. Due to this classification system takes into account a number of most common defects of power transformers and the reasons for their occurrence. A new approach to the classification of defects in power transformers can also take into account the processes that occur in them.*

**Keywords:** own normative term of service, aging power equipment, diagnostic systems of the power transformers.

Ю.В. МАЛОГУЛКО, В.В. ХАВТИРКО, М.В. ЗАТХЕЙ  
Вінницький національний технічний університет

### ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЛАСИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

*Об'єктом дослідження є силові трансформатори, а саме системи їх діагностування з урахуванням дефектів та аварійних процесів під час визначення оцінки стану обладнання. В ході дослідження використовувався комплексний підхід до вирішення поставлених завдань, включаючи світовий досвід, синтез результатів та ретроспективи, методи технічної діагностики, теорію прийняття рішень. В ході розробки класифікації дефектів була зроблена спроба виключити недоліки, виявлені в інших підходах, і запропоновано діагностування за принципом «від загального до конкретного».*

*Ключові слова:* власний нормативний термін служби, старіння енергетичного обладнання, діагностичні системи силових трансформаторів.

**Introduction.** High-voltage power transformers are the most important and expensive elements in the distribution system of electric energy. Reliability of electrical networks in most cases is determined by the reliability of high-voltage power transformers. Gradual aging of high-voltage power equipment takes place in all industrialized countries. Increasing the voltage levels and reducing the strength of the latest generations equipment has sharply raised the question of assessing its status and degree of risk beyond the normalized service life [1, 2].

In Ukraine, the number of transformers that exceeded its resource reaches 40 %, and for generating transformers with a capacity of more than 250 mVA, this figure is even higher and reaches 70 % [3, 4]. At present, in the Soviet Union countries energy system, about 45 % of transformers are in service for more than 20 years, 35 % over 25 years [5, 6]. A similar picture of the aging of the power transformers park is also observed in foreign power systems. So, for example, according to the US Electricity Institute's EPRI, in 2000, about 65 % of power transformers in US networks worked more than 25 years. About 30 % of transformers are over 30 years old in Japan.

Thus, the reliability of power high-voltage transformers, and, as a consequence, the reliability of the grid as a whole, will be determined by the reliability of transformers with a long service life, which far exceeds the estimated value.

Despite the fact that the design and manufacture of PT (power transformer) in Ukraine, was realised at a level not inferior to the best foreign firms, in operation they require the implementation of a set of preventive measures: chromatographic analysis of oil, electrical tests, current and capital repairs, etc. Because of the inadequate operation, as well as the physical and moral aging of equipment, the probability of accidents PT today is quite high. This, in turn, can lead to the following consequences:

- loss of the unit as a material value or the need for large investments for equipment restoration;
- «domino effect» probability, when the emergency process affects neighbouring equipment and the environment;
- a break in the electricity supply of consumers.

The latter circumstance can be a significant loss in a market economy, which in the end may exceed economic losses for the first two reasons. The problem is exacerbated by the fact that in modern electric networks, the operation of equipment that is exhausting or has long ago exhausted its normative resource continues and will continue.

Therefore, it is relevant to study the systems for diagnosing power transformers in order to generalize and simplify the classification in order to increase the efficiency of their operation.

The object of the study is power transformers, namely, their diagnostic systems, taking into account defects and emergency processes, when determining the state of the equipment.

As a result of the features of operation of high-voltage power transformers analysis, a number of problems have been identified that negatively affect the reliability of the functioning of electric networks in Ukraine:

1. The aging of power high-voltage transformers and the extremely low rates of their replacement, lead to the fact that the operation of transformers that have worked out their normative resource. In this regard, the greatest significance are the issues of improving the diagnostics of the state of such transformers and extending their service life.

2. About 30 % of the total number of technological violations of power high-voltage transformers is accompanied by internal short circuits, 24 % of which occurred with ignition and inflammation of transformers. In this case, the specific damage of transformers with internal short circuits permanently increases during operation. Transformer oil is the informative medium in the state of which 70 % of defects of power high-voltage transformers are detected.

3. The traditional system is not always able to assess the state of the working outdated equipment reliably. The existing system of diagnostics of the state of transformer oil does not allow to detect transformers with abnormal aging of oil at an early stage, that is, before these indicators have reached their limit values. The absence of the possibility of predicting the values of the characteristics of insulation, does not allow to realize the transition to repair and maintenance of transformers by their condition.

4. The most problematic defects in power transformers are: insulation failure between parallel branches, oil drainage, failure of the main and longitudinal insulation, troubles in the oil purification system. Classification of internal damages showed that the reliability of a modern transformer is largely determined by its isolation.

*The aim of research* is to improvement of classification system of defects and emergency processes in them to increase the effectiveness of measures in assessing them. To achieve this aim, it is necessary to perform the following objectives:

1. To research of systems of diagnostics of power transformers.
2. To research of defects of power transformers.

#### **Research of existing solutions of the problem**

According to the statistics of damages arising in power transformers [7–9]:

- about 22 % of technological violations are due to aging of materials;
- 19.4 % – defects in design and manufacturing;
- 16.8 % – the disadvantages of exploitation;
- 10.3 % – external influences;
- 5.8 % – unmatched modes in the network;
- 4.2 % – repair defects;
- 3.5 % – climatic and external influences.

From the analysis of literary sources [10–12] it was established that the parameters of diagnosing the processes of thermal wear of insulation are:

- the multiplicity of the current strength consumed by the power transformer;
- the excess temperature of the windings over the ambient temperature;
- the temperature of the windings, the temperature of the oil;
- the speed of thermal wear of the insulation windings.

The traditional approach to assessing the technical condition of transformers during operation is presented in [13]. In this approach, the transformer is presented as separate components: winding, core, insulating fluid, inputs, switching device, tank and associated devices [14].

The scope of the known tests has been supplemented with new ones, through which measurements can be made on a working transformer (acoustic and electrical measurements, vibration, acoustic and thermo-visual inspection [15], etc.). But in essence, an approach based on the monitoring of the established characteristics is maintained. The main disadvantages of the traditional system of monitoring the state of transformer oil [5, 14] are as follows:

1. Absence of direct dependence between controlled parameters and functional capacity of the transformer (safety margin).
2. Possibility of incorrect diagnosis and unreasonable actions (unnecessary drying due to the small value of insulation resistance, rejection of the core by the data of idle losses at low voltage, incorrect interpretation of signals of partial discharges, etc.).
3. Excess test volume (in many cases, only 5–10 % of the tests are effective).
4. Failure to consider possible defects that are not detected by the set volume of the test (e. g., pollution of the insulation, local humidification and insulation aging, deterioration of contact resistance, etc.).
5. Practical impossibility of foreseeing the future state, including the residual isolation resource.

Recently, for the purpose of assessing the status of power transformers, an integrated diagnostic survey is increasingly used, which consists of defining the nature and level of defects in all systems and nodes of transformers [16, 17]. The program of complex diagnostic examination includes the following stages:

- analysis of accidents and typical defects of this type of transformers;
- an overview of the transformer and the collection of technical information (on modes of operation,

load, short-circuit currents and operating voltage, features of operation, consumers, climatic conditions, atmospheric pollution, etc.);

- analysis of technical documentation and results of operational measurements;
- electrical measurements on the disconnected transformer ( $\text{tg}\delta$  and R isolation of windings and leads, resistance of direct current windings, idle speed and short circuit resistance, etc.);
- measurements on the working transformer in load and idle modes (measurement of partial and other electrical discharges, location of discharges with the help of acoustic devices, thermo-visual inspection of all transformer nodes, vibration testing of the tank as well as oil pumps);
- sampling of oil from a tank, oil-filled inlets, contactors of the device of regulation under voltage and carrying out of physical-chemical analyzes in the laboratory;
- preparation and issue of a technical report, which presents the results of the survey and their analysis, a conclusion on the condition of the transformer and recommendations for further operation, and, if necessary, the volume and method of repair work.

The most significant disadvantage of complex diagnostic examination [5] is the high cost of conducting such an examination and, consequently, the impossibility of performing it on all transformers. An alternative to complex diagnostic examination [5], can serve as a diagnostic technology by ranking the equipment according to the technical condition and determining the part of the equipment that really needs a comprehensive survey. Ranking technology can be based both on the experience of operating the same type of equipment, and on determining the most likely defects of transformers and the degree of their danger for this design in these operating conditions.

The investigation of defects in power transformers and the analysis of various proposed classifications in [13, 18, 19] showed that such classifications have a number of drawbacks. In particular, in [13] the classification of defects in power transformers is reduced to two groups – thermal and electrical defects, which does not take into account all the diversity of possible damages in the transformer. The logic scheme for the transformers defects classification, which is given in [18], does not link the damage with specific structural elements of the transformer. In [19] defects are largely duplicated for each constructive system of the transformer.

Summing up the above analysis of literary sources, it should be noted the absence of a section of abnormal processes that cause the defect, and the structural elements of the transformer. This emphasizes the necessity of diagnosing from the fact that there is an abnormal process throughout the object and duration in the direction of detailing the nature of the process, specifying the place of the defect or both at the same time.

**Research results.** In the automated diagnostic systems [2] the classification of defects should facilitate the consistent involvement of various diagnostic methods for the most reliable and economical detection and assessment of the danger degree, as well as for the most accurate localization of the defect.

The most important direction in optimizing the operation of high-voltage transformers is the concept of transition to repair and maintenance of transformers by their condition. This transition implies not only high probability in assessing the state of the equipment, but also the ability to predict its behaviour, which is currently absent. Presently, expert systems and systems for monitoring the condition of power transformers are widely used [4]. Despite the wide range of controlled parameters (including live working), these systems have a significant drawback – decision-making methods are based on the traditional diagnostic system. There is a discrepancy between the use of modern information systems and measuring instruments and methods of processing received information.

Taking into account the considered classifications, proposed to use an improved defect classification system (Fig. 1), which eliminates such limitation as discussed in [13, 18, 19]. Such a system of defects classification of power transformers in most cases is sufficient to assess the state of the transformer in the first phase of the diagnosis.

Among the most problematic are the following defects in power transformers, such as: failure of isolation between parallel branches, oil drain, and failure of the main and longitudinal insulation, disturbances of the oil purification system. Classification of internal damages of transformers showed that the reliability of a modern transformer is largely determined by its isolation.

An advanced classification system of power transformers defects was proposed, in which an attempt was made to exclude shortcomings found in other approaches, it allows to divide the abnormal processes that cause the defect and constructive elements of the transformer. Such a classification system takes into account a number of most frequent defects of power transformers and the causes of their occurrence.

#### Summary

1. As a result of the analysis of the current state of power equipment of Ukraine and the CIS countries, it was discovered that most of the damage that occurs in power transformers is due to:

- aging of materials;
- defects in design and manufacturing;
- operating defects;
- external influences;
- unmatched modes in the network;
- defects in repairs and climatic and external influences.

Research of the systems of diagnostics of power transformers has shown that in each approach try to use a wide range of similar types and methods of tests of power transformers, but at the same time a certain mechanistic approach is seen when a new type of test is used without an analysis of its economic efficiency.

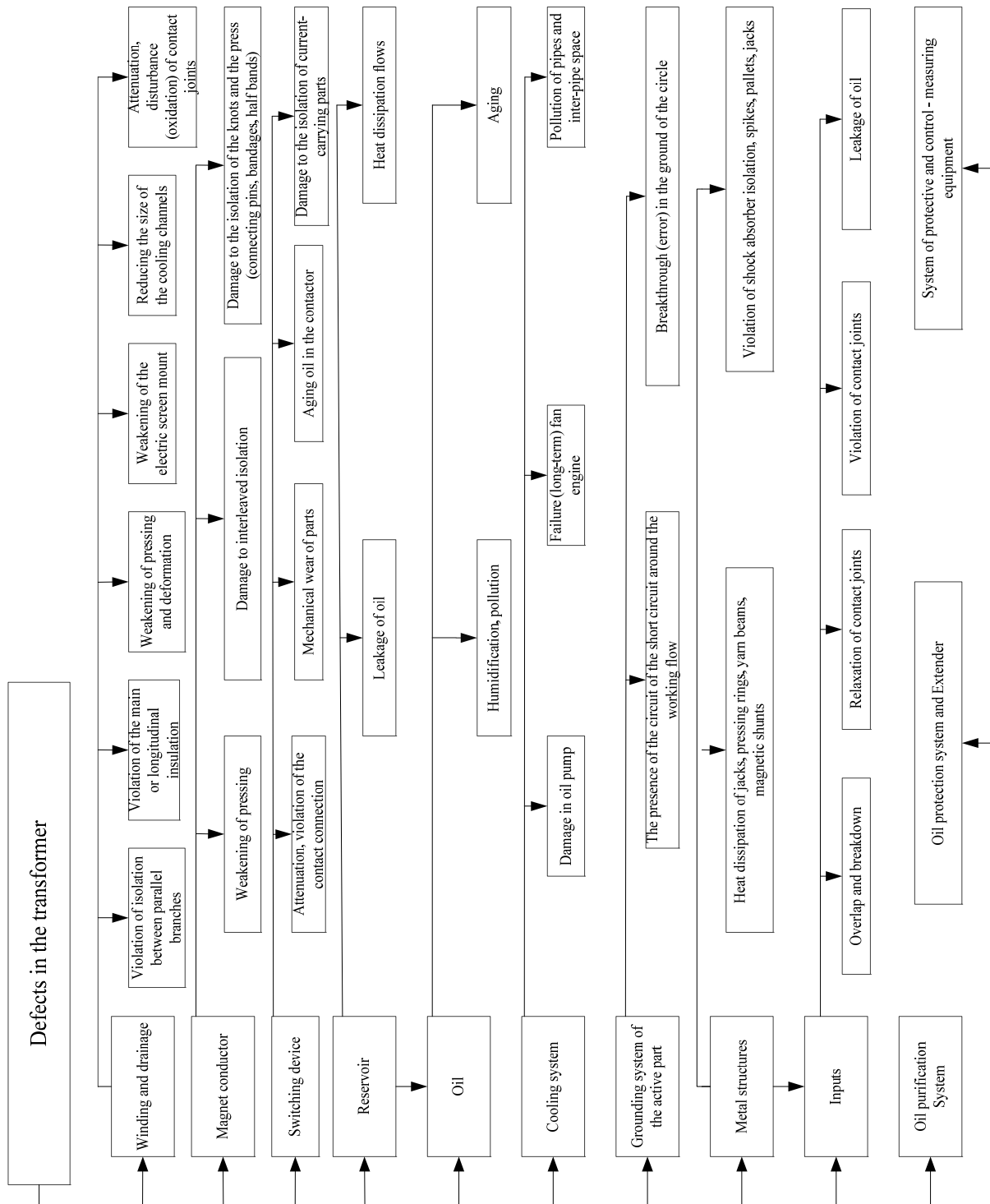


Fig. 1. An advanced system of classification of power transformers defects

2. In the study of defects of power transformers, it was found that the classification of defects should facilitate the consistent involvement of various diagnostic methods for the most reliable and economical detection and assessment of the degree of danger, as well as for the most accurate localization of the defect.

Improvement of the classification system of defects of power transformers makes it possible to exclude the deficiencies found in other approaches and the diagnosis on the principle of «from general to specific» is proposed. This approach to the classification strictly separates the abnormal processes that cause the defect, and the structural elements of the transformer; diagnostics begins with the statement of the fact that an abnormal process exists throughout the object and continues in the direction of detailing the nature of the process, specifying the place of the defect or both at the same time.

## References

1. Havtyko, V. (2018). Investigation of defects in power transformers. *XLVII Scientific and Technical Conference of the Faculty of Electrical and Electrical Engineering*, 2018. Access mode: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2018/paper/view>.
2. Savvaitov, D. S., Timashova, L. B. (2004). Technical condition of the main equipment of substations and BJ1 and measures to increase reliability. *Electric power stations*, 8, 14–18.
3. Alekseev, B.A., Kogan, F.L., Mammiconyants, L.G. (2002). *RD 34.45- 51.300-00. Volume and norms of tests of electric equipment*. 6th ed. Moscow: Publishing house of NC ENAS, 256.
4. Mordkovich, A. G., Horozhkin, P. A. (2007). About the construction of subsystems for monitoring, control and diagnostics of equipment of ultra-high voltage substations and their integration into the ACS of the TP PS. *Electrical stations*, 6, 44–54.
5. Sokolov, V. V. (2007). Measures for increasing the efficiency of diagnostics of the state of transformer equipment. *Perspective technologies of electric power industry: IX Symposium «Electrical Engineering 2030»*. Moscow: CD-edition «TRVEK».
6. Alekseev, B. A., Mamikonyants, L. G., Savvaitov, D. S. (2005). Basic electrical equipment of electric power stations and networks. *Electrical stations*, 2, 48–57.
7. Alekseev, B. A. (2002). Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers. Moscow: Publishing house NTS ENAS, 216.
8. Berg, O., Herdlear, K., Dahlung, M. (2002). Experience from on-site transformers oil reclaiming. *Session 2002 CIGRE*.
9. Pantic, V. A., Pantic, D. V., Microsavljjevic, B (2002). Extention of the lifetime and increase of the transformer operation safety on the grid. *Session 2002 CIGRE*.
10. Vanin, B. V., Lviv Yu. N., Lviv, M. Yu. (2004). Operation of power transformers when reaching the maximum permissible wear indicators of winding insulation. *Electric stations*, 2, 56–60.
11. Makarevich, L. V., Shifrin, L. N., Alpatov, M. E. (2008) Current trends in the creation and diagnosis of high-power power transformers. *News of the Academy of Sciences. Power engineering*, 1, 45–69.
12. Malewski, R., Khrennikov, A. Yu., Shlegel, O. A., Dolgoplov, A. G. (1995). Monitoring of Winding in HV Tranformer in Service. *CIGRE*. Italy, Padua.
13. *RD 34.45-51.300-97. Volume and norms of testing of electrical equipment*. (1998). 6th ed. Moscow: ENAS, 296.
14. Bondarenko, V. E., Shchapov, P. F., Shutenko, O. V. (2007). *Increase of efficiency of operational measuring control of transformer oils*. Kharkiv: NTU «KhPI», 452.
15. Khrennik, A. Yu., Sidorenko, M. G., Straton, E. P. (2008). Thermal imaging as a tool for alarms prevention of high-voltage electrical equipment of substations. *Electro*, 4, 27–31.
16. Lyapin, A. G., Pevchev, B. G., Pimoshin, A. A. (2005). An integrated approach to the diagnostics and evaluation of the technical state of the power equipment. *Electrical stations*, 8, 64–67.
17. Valley, A. P., Dolin, A. P., Lenkov, A. Yu. (2005). Diagnostics of the developing defects of power transformers. *Electrical stations*, 8, 49–53.
18. Vinogradova, L. V., Ignatyev, E. B., Larionov, V. N. (1997). Computer system of diagnostics of transformer equipment. *Improvement of the efficiency of the thermal power station and power systems: Proceedings of the IGEU/IGEU*, 203–208.
19. *RD 153-34.0-46.302-00. Methodical instructions for diagnostics of developing defects of transformer equipment by the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil*. (2001). Ut. Department of scientific and technical policy and development of RAO UES of Russia 12.12.2000; Develop Department of JSC VNIIE, ZAO Izolimator. Term of validity, established since 01.01.2001, 42.

Рецензія/Peer review : 11.10.2018 р.      Надрукована/Printed :21.11.2018 р.  
Public Reviewer: doctor of technical sciences, professor Lezhnyuk P.D.

О.Ю. ОЛІЙНИК, О.С. ЧОРНА, Д.А. ЛОСІХІН  
Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРОЧАСТОТНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ПРИРОДНИХ ІНТЕНСИФІКУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ

*В роботі досліджували процеси, що відбуваються в рідині під дією пульсуючої в рідині бульбашки газу, яка виступає в ролі сферичного випромінювача. Була розроблена математична модель віброчастотного методу контролю природних інтенсифікуючих впливів на тепломасообмінні процеси у відповідності до запропонованої розрахункової схеми.*

*Ключові слова: віброчастотний метод, інтенсифікація процесу, тепломасообмін, частота коливання, пульсація.*

OLGA OLIYNYK, OLENA CHORNA, DMITRIY LOSIKHIN  
Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro

## MATHEMATICAL MODEL OF HYDROCONTRACTIVE METHOD FOR CONTROL OF NATURAL INSYCIQUE EFFECTS ON HEAT-EXCHANGE PROCESSES

*The main methods for controlling heat and mass exchange gas-liquid processes are generally accepted measurements of pressure, velocity, liquid level before or after the apparatus, which do not provide information on the intensity of the turbulence process or the resulting pulsations. In addition, the measured quantities can not characterize the arising pulsations that characterize the heat and mass transfer process. Therefore, the development of a universal method for controlling the arising effects in the phase contact zone is a promising aspect of the solution of the current scientific task of controlling the intensification of heat and mass exchange processes in gas-liquid vehicles. When gas and liquid are contacted due to the simultaneous occurrence of pressure fluctuations caused by different causes and having different amplitude-frequency characteristics, a complex oscillatory system with many degrees of freedom is formed. Elements of the structure of the gas-liquid system can be represented as unconnected resonators with different natural frequencies of oscillations. The main task of controlling the intensification of processes in gas-liquid systems by a vibro-frequency method is to measure the amplitude-frequency characteristics of the oscillations. In the article, the processes occurring in a liquid under the action of a gas bubble pulsating in a liquid were studied, which acts as a spherical radiator. A mathematical model of the vibration frequency control method of natural intensifying the effects on heat and mass exchange processes was developed in accordance with the proposed design scheme. The obtained dependence of the dynamic density of the mixture from water and air bubbles on the vibration frequency of the mixture, confirms the expediency of using the vibration frequency of the excited medium as a control parameter of natural intensifying effects on heat exchange processes.*

*Keywords: vibration frequency method, process intensification, heat and mass transfer, frequency, bubble, pulsation.*

### Введення

Інтенсифікація хіміко-технологічних процесів і підвищення роботи ефективності технологічного обладнання є одним із пріоритетних завдань розвитку науки і техніки у теперішній час. У якості кількісної

характеристики інтенсивності ХТП використовують вираз  $t = \frac{M}{SF}$ , який показує кількість перенесеної речовини (енергії)  $M$  кг (Дж) через одиницю площі (обсягу)  $S$  м<sup>2</sup> (м<sup>3</sup>) за одиницю часу  $t$  [1].

Принцип контролю інтенсифікуючих впливів полягає у визначенні залежності кількісної характеристики інтенсифікації від основних геометричних і режимних параметрів ХТП, фізичних параметрів оброблюваного середовища та встановленні необхідності збільшення або зменшення зазначених параметрів для максимізації ефективності процесу [2].

Лінійні закони перенесення типу  $dM / dt = kSF$ , де  $F$  – рушійна сила процесу;  $k$  – коефіцієнт швидкості технологічного процесу, можуть бути використані для аналізу процесу інтенсифікації тільки в припущенні про незначність відхилення даного процесу від стану термодинамічної рівноваги і малості градієнтів потенціалів перенесення. Інтенсифікація ХТП в оброблюваному середовищі відбувається за рахунок нелінійних фізико-хімічних ефектів при синергетичному багатофакторному впливі. Саме вплив на оброблюване середовище може бути лінійним, прямим, але прискорення ХТП відбувається за рахунок нелінійних ефектів 2-го порядку, наприклад кавітації, турбулентності, фазових переходів [3].

Для більшості реальних тепломасообмінних, деяких гідромеханічних процесів при інженерних рішеннях з вибору факторів, на які необхідно впливати для збільшення інтенсифікації, відсутні розроблені методики проведення контролю інтенсифікації зазначених процесів [4].

### Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми

Сьогодні існує багато пристроїв та засобів для інтенсифікації технологічних процесів. Насамперед, це різноманітні пристрої, що забезпечують турбулізацію, перемішування потоків для підвищення тепломасопереносу [5]. У роботі [6] автори пропонують для інтенсифікації процесу нагріву води в апараті зануреного горіння використовувати електро- та магнітні поля. У роботі [7] для інтенсифікації процесів тепломасообміну застосовують допоміжні насадки колонних апаратів. Автори [8] описують досвід використання кавітаційного обладнання для інтенсифікації тепломасообмінних процесів. Таким чином, більшість застосовуваних інтенсифікуючих впливів є штучно створеними та вимагають додаткових затрат



енергії. Контроль ефективності таких впливів найпростіше виконувати шляхом контролю енергії, що використовується для створення впливу [4]. Також широко застосовуються непрямі методи контролю інтенсифікуючих впливів (вимірювання температури, тиску та ін.) з наступним розрахунком ефективності технологічного процесу.

Актуальною метрологічною задачею є сьогодні контроль природних інтенсифікуючих впливів на технологічні процеси, які раніше не контролювалися та розглядалися як збурення. У багатьох технологічних процесах, які супроводжуються барботажем та турбулізацією потоків, можна підвищити ефективність за рахунок контролю природних інтенсифікуючих впливів.

У загальному контактуванні газу і рідини у теплообмінних процесах через одночасну появу за різних причин коливань тиску, що мають різні амплітудно-частотні характеристики, утворюється складна коливальна система з багатьма ступенями свободи. Елементи структури такої системи можна уявити як незв'язані між собою резонатори з різними власними частотами коливань. Тоді основне завдання контролю природних інтенсифікуючих впливів на тепломасообмінний процес віброчастотним методом зводиться до контролю амплітудно-частотних характеристик коливань середовища [9].

#### Мета і завдання дослідження

**Мета даної роботи:** розробити засади віброчастотного методу контролю інтенсифікації тепломасообмінних та газорідних процесів. Для досягнення поставленої мети в задачі необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити процеси, що відбуваються в рідині під дією пульсуючої в рідині бульбашки газу, яка виступає в ролі сферичного випромінювача;
2. Розробити математичну модель віброчастотного методу контролю природних інтенсифікуючих впливів на тепломасообмінні процеси у відповідності до запропонованої розрахункової схеми.

#### Вібраційний метод контролю природних інтенсифікуючих впливів

Розглянемо випадок, коли інтенсифікація тепломасообмінного процесу виконується за рахунок зміння режиму подачі компоненту  $F_2$  (рідина або газ) у резервуар з рідиною  $F_1$ . У цьому разі для газорідної або рідинної сумішей речовина з витратою  $F_2$  являє собою збуджуюче середовище. За рахунок передачі енергії всередині апарату утворюється коливальна система, контроль параметрів якої можна використовувати в якості параметрів контролю інтенсифікації тепломасообмінного процесу.

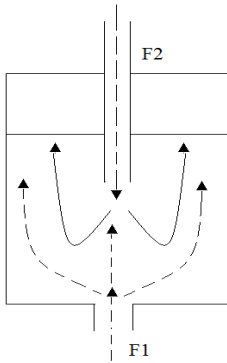


Рис. 1. Розрахункова схема до розрахунку методу контролю інтенсифікуючих впливів на газорідну систему

На рис. 1 представлена схема тепломасообмінного процесу в загальному вигляді. У резервуар (технологічний апарат) подаються протічечію матеріальні потоки з витратами  $F_1$  і  $F_2$ . Кожен потік характеризується температурами ( $T_1$ ,  $T_2$ ), швидкостями ( $v_1$ ,  $v_2$ ), густиною ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ). Якщо прийняти припущення, що  $\rho_1 > \rho_2$ , то суміш всередині апарату представляє собою рідину з бульбашками рідини з меншою щільністю (в тому випадку, якщо потік  $F_2$  це рідина) або бульбашками газу (якщо потік  $F_2$  – газ).

При взаємодії двох потоків  $F_1$  і  $F_2$  утворюються бульбашки. Бульбашки являють собою сферичну форму з однаковим радіусом  $a$  і об'ємним вмістом  $\alpha$ . Якщо суміш переміщується з деякою швидкістю  $u(t)$  в напрямку  $x$ , то в суміші створюється градієнт тиску [10]:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho_c \frac{du}{dt}, \quad (1)$$

де  $\rho_c = \rho_{pid}(1-\alpha) + \rho_e \alpha$  – статична густина суміші ( $\rho_2 = \rho_e$ ). У разі, якщо  $dx$  суттєво більше радіусу бульбашки, то суміш являє собою гомогенну рідину. Тиск у суміші, зумовлений прискоренням руху системи, досить малий, тому стисненням бульбашок можемо знехтувати.

$$P \ll P_{\max} = -\rho_c \frac{du}{dt} L \ll P_0, \quad (2)$$

де  $L$  – характерний розмір сферичної бульбашки,  $P_0$  – тиск у нерухомій суміші.

Навколо кожної бульбашки градієнт тиску визначається густиною рідини та відповідно дорівнює  $\rho_{pid} \frac{du}{dt}$ . Тому на кожну бульбашку діє виштовхувальна сила, під дією якої бульбашка рухається відносно суміші зі швидкістю  $w(t)$ :

$$F_a = \frac{4}{3} \pi \rho_{pid} a^3 \frac{du}{dt}. \quad (3)$$

Нехтуючи густиною речовини усередині бульбашки, рівняння відносного руху бульбашки можна записати у вигляді:

$$m \frac{dw}{dt} = \frac{4}{3} \pi \rho_{pid} a^3 \frac{du}{dt} - R, \quad (4)$$

де  $m$  – приєднана маса рідини до сферичної бульбашки, що визначає інерційність бульбашки;  $R$  – сила

опору, що діє на бульбашку при її відносному русі. При русі декількох бульбашок у рідині, кожна з них знаходиться в умові стисненого обтікання. Поле швидкості навколо кожної бульбашки стрімко зменшується зі збільшенням відстані від її центру. Тому основний внесок в кінетичну енергію, що визначає приєднану масу, вносять області рідини, які примикають до бульбашки. Таким чином, будемо вважати, що бульбашка оточена шаром рідини радіуса  $b$ ,  $(a/b)^3 = \alpha$ . Тоді застосуємо формулу Стокса для приєднаної маси сфери, що оточена сферичною концентричною оболонкою [11], отримаємо:

$$m \frac{dw}{dt} = \frac{2}{3} \pi \rho_{pid} a^3 \frac{2a^3 + b^3}{b^3 - a^3} = \frac{2}{3} \pi \rho_{pid} a^3 \frac{2\alpha + 1}{1 - \alpha}. \quad (5)$$

Визначимо силу опору, що діє на бульбашку в умовах стисненого обтікання з використанням швидкості дисипації енергії (швидкість з якою турбулентна кінетична енергія перетворюється у тепло за рахунок в'язкого тертя):

$$R = -\frac{1}{2} \frac{\dot{E}}{\dot{w}}. \quad (6)$$

При русі бульбашок у чистій рідині безвідливний характер їх обтікання відбувається у широкому діапазоні чисел Рейнольдса  $Re$ . Для коливального руху бульбашок при великих значення  $Re$  сила опору залежить від миттєвого значення швидкості бульбашки та відповідає дисипації енергії в потенційному приближенні [11].

В загальному випадку, швидкість дисипації енергії в рідині, що займає об'єм  $V$  [6], буде рівною:

$$\dot{E} = \frac{\mu}{2} \int_V \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2 dV. \quad (7)$$

Якщо рух рідини потенціальний, то інтеграл об'єму перетворюється у інтеграл поверхні, що обмежує рух рідини (правомірність цього підтверджується в [12]):

$$\dot{E} = -\mu \int_S \left( \frac{\partial V}{\partial n} ds = -2\mu \int_S \left( v_n \frac{\partial v_n}{\partial n} + \frac{\partial v_\tau}{\partial n} \right) ds, \quad (8)$$

де  $v_n, v_\tau$  – нормальні та тангенційні складові швидкостей поверхні рідини,  $n$  – напрям зовнішньої нормалі. При цьому у межах сферичних комірок повинна виконуватись умова:

$$\begin{aligned} v_n &= 0, & \frac{\partial v_\tau}{\partial n} &= 0; \\ v_\tau &= 0, & \frac{\partial v_n}{\partial n} &= 0. \end{aligned}$$

Таким чином, інтеграл по поверхні сферичної комірки буде рівним 0.

Для обчислення швидкості дисипації енергії у одній сферичній бульбашці, інтегрування необхідно проводити тільки по поверхні бульбашки. Використаємо сферичну модель:

$$\dot{E} = -2\mu \int_0^\pi \left( v_\theta \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right)_{r=0a} 2\pi a^2 \sin \theta d\theta, \quad (9)$$

де  $v_\theta$  – тангенційна складова поля швидкостей у сферичній комірці у системі координат, яка зв'язана з сферою, що рухається  $(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r})_{r=0a} = 0$ . Потенціал поля швидкості у цьому випадку дорівнює:

$$\varphi = w \left[ \frac{a^3}{b^3 - a^3} \left( r + \frac{b^3}{2r^2} \right) + r \right] \cos \theta. \quad (10)$$

Відповідні розподілення тангенційної швидкості та її похідна має вигляд:

$$\begin{aligned} v_\theta(r, \theta) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = w \left[ \frac{a^3}{b^3 - a^3} \left( 1 + \frac{b^3}{2r^3} \right) + 1 \right] \sin \theta, \\ \frac{\partial v_\theta(r, \theta)}{\partial r} &= -\frac{2}{3} w \frac{a^3 b^3}{(b^3 - a^3) r^4} \sin \theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Підставивши (11) та (10) у (9), при умові, що  $\alpha = \frac{a^3}{b^3}$ , отримаємо:

$$\dot{E} = -12\pi \mu a w^2 s \frac{1 + (a/b)^3}{(1 - (a/b)^3)^2}, \quad (12)$$

Враховуючи, що  $\frac{a^3}{b^3} = \alpha$ , та підставивши його у вираз (6), отримаємо:

$$R = 12\pi\mu a w \frac{1+\alpha}{(1-\alpha)^2}. \quad (13)$$

У випадку, коли об'ємний вміст  $\alpha = 0$ , отримане співвідношення (12) збігається з виразом, що було отримано у [12] для одиночної бульбашки у безмежному об'ємі рідини.

Підставивши (5) та (13) в (4), отримаємо рівняння відносного руху сферичної бульбашки в наступному вигляді:

$$\frac{dw}{dt} + Bw = A \frac{du}{dt}, \quad (14)$$

де коефіцієнти  $A$  та  $B$  дорівнюють:

$$A = \frac{2(1-\alpha)}{2\alpha+1},$$

$$B = \frac{18\nu(1+\alpha)}{\alpha^2(1-\alpha)(2\alpha+1)}. \quad (15)$$

Для абсолютного руху сферичної бульбашки рівняння руху прийме вигляд:

$$\frac{dv}{dt} + Bv = (A+1) \frac{du}{dt} + Bu. \quad (16)$$

Визначимо імпульс сили, який потрібно приложити до сферичної комірки для того, щоб викликати її рух зі швидкістю  $u(t)$ :

$$I = \int_0^t F(\tau) d\tau = \frac{\partial E_k}{\partial u}, \quad (17)$$

де  $F(\tau)$  – миттєва сила,  $E_k$  – кінетична енергія рідини у комірці. Швидкість руху бульбашки при цьому повинна визначатись з рівнянь (14) з урахуванням (15).

У випадку, коли комірka у формі сфери з бульбашкою усередині рухається у одному напрямі зі швидкостями  $u$  та  $v$ , то потенціал поля швидкостей, задовольняючий рівнянню Лапласа  $\nabla^2\varphi=0$  і граничним умовам:

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right|_{r=a} = -v \cos\theta,$$

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right|_{r=b} = -u \cos\theta, \quad (18)$$

має вигляд, у відповідності до (7):

$$\varphi = \frac{\cos\theta}{b^3 - a^3} \left[ (a^3 v - b^3 u) r + \frac{a^3 b^3 (v - u)}{2r^2} \right]. \quad (19)$$

Обчислимо кінетичну енергію рідини у комірці:

$$E_k = -\frac{1}{2} \rho_{pid} \left[ \int_{S_a} \left( \varphi \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right)_{r=a} ds_a - \int_{S_b} \left( \varphi \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right)_{r=b} ds_b \right] =$$

$$= \frac{\pi \rho_{pid} b^3}{3(1+\alpha)} \left[ (v-u)^2 \alpha + 2(\nu\alpha - u)^2 \right] \quad (20)$$

Знак мінус перед інтегралом пов'язаний з тим, що напрям нормалі до поверхні при  $r = b$  протилежний до напрямку  $r$ . Підставивши (20) у (17), отримаємо:

$$I = \frac{2\pi \rho_{pid} b^3}{3(1-\alpha)} \left[ (2\nu\alpha^2 - 3u\alpha + \nu\alpha) \frac{\partial v}{\partial u} + u\alpha - 3\nu\alpha + 2u \right]. \quad (21)$$

Отримана залежність (21) свідчить про те, що імпульс сили системи складним чином пов'язаний зі швидкістю руху комірки  $u(t)$  і швидкістю руху бульбашки  $v(t)$ . В деяких випадках вираз (21) можна спростити.

У випадку, коли прискорення рідини достатньо мале або в'язкість рідини велика ( $du/dt \ll du$ ), бульбашки у рідині практично не рухаються ( $v(t) \approx u(t)$ ,  $\frac{dv}{du} \approx 1$ ). У зазначеному випадку імпульс сили буде рівним добутку статичної маси комірки на її швидкість:

$$I = \frac{4}{3} \pi \rho_{pid} b^3 (1-\alpha) u(t). \quad (22)$$

Якщо рідина має малу в'язкість чи прискорення тіла достатньо велике, то рівняння руху бульбашки буде мати вид:

$$\frac{dv}{dt} + Bv = (A+1) \frac{du}{dt} \tag{23}$$

Прирівнявши постійну інтегрування до 0, отримаємо:

$$v(t) = (A+1)u(t) = \frac{3}{2\alpha+1}u(t), \tag{24}$$

$$\frac{\partial v}{\partial u} = \frac{3}{2\alpha+1}.$$

Підставивши (24) у (21), отримаємо для даних умов вираз:

$$I = \frac{4}{3} \pi \rho_{pid} b^3 \frac{1-\alpha}{2\alpha+1} u(t). \tag{25}$$

Множник  $\frac{4}{3} \pi \rho_{pid} b^3 \frac{1-\alpha}{2\alpha+1}$  у виразі (25) являє собою динамічну масу комірки [13]. Оскільки модель передбачає, що усі комірки однакові, то, поділивши динамічну масу на об'єм комірки, можна отримати динамічну густину суміші:

$$\rho_{дин} = \rho_{pid} \frac{1-\alpha}{2\alpha+1}, \tag{26}$$

яка відрізняється від статичної густини в  $1/(2\alpha+1)$  раз. Цей результат свідчить про те, що при прискорених рухах суміші бульбашки речовини (рідини чи газу) зміщуються відносно суміші в протилежну сторону, рідина при цьому перетікає у протилежний бік. Центр рідини має менше прискорення, ніж геометричний центр бульбашки.

Нехай рідина всередині апарату здійснює малі гармонічні коливання  $u(t) = u_0 \sin \omega t$ . Врахуємо, що інерційна сила, яка визначається динамічною густиною та прискоренням тіла, не виконує роботи за період коливання:

$$\int_0^{t_0} F_{ин}(\tau) u(t) dt = 0. \tag{27}$$

Оскільки гідродинамічна сила  $F = dl / dt$ , то для виконання умови (27) імпульс сили повинен змінюватися синфазно зі змінням швидкості рідини  $u(t)$ .

Представимо відносну та абсолютну швидкості руху бульбашки у вигляді суми складових:

$$\begin{aligned} w(t) &= w_1 \sin(\omega t) + w_2 \cos(\omega t), \\ v(t) &= v_1 \sin(\omega t) + v_2 \cos(\omega t). \end{aligned} \tag{28}$$

Підставивши (28) в рівняння руху (14) та (16), прирівнявши складові з  $\sin \omega t$  та  $\cos \omega t$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{w_1}{u_0} &= \frac{A\omega^2}{\omega^2 + B^2}, \quad \frac{w_2}{u_0} = \frac{AB\omega}{\omega^2 + B^2}, \\ \frac{v_1}{u_0} &= \frac{(A+1)\omega^2 + B^2}{\omega^2 + B^2}, \quad \frac{v_2}{u_0} = \frac{AB\omega}{\omega^2 + B^2}. \end{aligned} \tag{29}$$

Таким чином, підставивши  $\frac{v_1}{u_0}$  в (21) та поділивши отриманий результат на швидкість та об'єм комірки, отримаємо динамічну густину рідини у випадку коливального руху:

$$\rho_{дин} = \rho_{pid} \left[ 1 - \alpha \frac{(A+1)\omega^2 + B}{\omega^2 + B^2} \right]. \tag{30}$$

У випадку, коли суміш рідини являє собою малов'язку рідину ( $B \ll \omega$ ), то формула (30) приймає вигляд (26). Якщо суміш рідини характеризується великою в'язкістю ( $B \gg \omega$ ), вираз (30) перетворюється на відомий вираз статичної густини  $\rho_c = \rho_{pid}(1-\alpha)$

На рис. 2 представлена залежність динамічної густини суміші з води ( $\nu=10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с) та бульбашками повітря ( $\alpha=0,1-0,4$  см) від частоти коливання суміші (об'єм досліджуваного резервуару 0,024 м<sup>3</sup>).

Як помітно з рисунку, при збільшенні частоти коливань динамічна густина зменшується, при  $\omega$  більше ніж 60 рад/с становиться постійною величиною, у відповідності до співвідношення (26).

**Висновок**

Розроблена математична модель методу контролю інтенсифікуючих впливів на тепломасообмінний

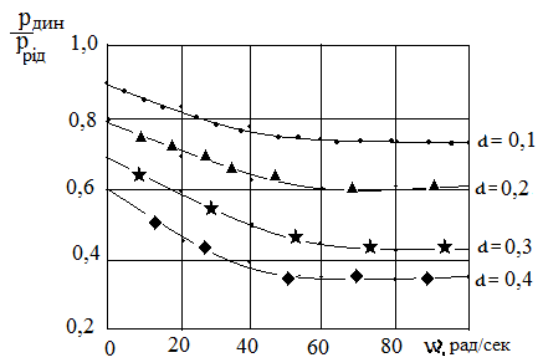


Рис. 2. Залежність динамічної густини суміші від частоти коливання середовища

процес у газорідній системі з інтенсифікуванням за рахунок передачі енергії від збуджуючого середовища до збуджуваного підтверджує, що доцільно використовувати частоту коливання збудженого середовища у якості параметра контролю.

### Література

1. Палаш А. А. Інтенсифікація тепло- і масообмінних процесів / Палаш А. А., Бут С. А. – 2008. – № 7. – С. 53–56.
2. Лаптев А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов : учебно-справочное пособие / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М. : Теплотехник, 2011. – 335 с.
3. Хмелев В. Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах / В. Н. Хмелев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 1.
4. Van Gerven T. Structure, energy, synergy, time. The fundamentals of process intensification / T. Van Gerven, A. Stankiewicz // Industrial & engineering chemistry research. – 2009. – Т. 48. – № 5. – С. 2465–2474.
5. Дмитриев А. В. Разработка новых видов контактных устройств для интенсификации тепломассообмена и повышения энергосбережения / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 8.
6. Nikolsky V. Application of electromagnetic fields for intensification of heat and mass exchange in combined gas-liquid processes / V. Nikolsky, O. Oliynyk, V. Yaris, I. Reshentniak // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol. 87. – P. 33–39.
7. Пушнов А. С. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена / А. С. Пушнов // Химическая технология. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 244–250.
8. Gogate P. R. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: a critical review / P. R. Gogate // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Т. 47. – № 4. – С. 515–527.
9. Олейник О.Ю. Метод контроля интенсификации тепломассообменных газожидкостных процессов виброакустическим методом / О.Ю. Олейник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – Т № 1. – № 43. – С. 43–49.
10. Ховалыг Д. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах / Д. Ховалыг, А. В. Бараненко // Вестник Международной академии холода. – 2012. – № 1.
11. Бошнятов Б. В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред / Б. В. Бошнятов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2005. – Т. 308. – № 6.
12. Каричев З. Р. Растворение в жидкости движущихся пузырьков газа / З. Р. Каричев, А. Л. Мулер // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40. – № 1. – С. 102–105.
13. Taranenko Y.K. Theoretical Basis for Fused-Quartz Resonator Flow Tube Design / Y.K. Taranenko, O.Y. Oliynyk, N.A. Minakova, O.V. Titova // Measurement Techniques. – 2018. – № 61 (3). – P. 314–320.

### References

1. Palash A. A. Intensyfikatsiia teplo- i masoobminnykh protsesiv / Palash A. A., But S. A. – 2008. – № 7. – S. 53–56.
2. Laptev A.G. Metodyi intensifikatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov : uchebno-spravochnoe posobie / A.G. Laptev, N.A. Nikolaev, M.M. Basharov. – M. : Teplotehnik, 2011. – 335 s.
3. Hmelev V. N. Razrabotka pezoelektricheskikh ultrazvukovykh kolebatelnykh sistem dlya intensifikatsii protsessov v gazovykh sredah / V. N. Hmelev // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2010. – № 1.
4. Van Gerven T. Structure, energy, synergy, time. The fundamentals of process intensification / T. Van Gerven, A. Stankiewicz // Industrial & engineering chemistry research. – 2009. – Т. 48. – № 5. – S. 2465–2474.
5. Dmitriev A. V. Razrabotka novykh vidov kontaktnykh ustroystv dlya intensifikatsii teplomassoobmena i povysheniya energosberezeniya / A. V. Dmitriev, I. N. Madyishev // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. – 2015. – Т. 18. – № 8.
6. Nikolsky V. Application of electromagnetic fields for intensification of heat and mass exchange in combined gas-liquid processes / V. Nikolsky, O. Oliynyk, V. Yaris, I. Reshentniak // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol. 87. – P. 33–39.
7. Pushnov // Himicheskaya tehnologiya. – 2014. – Т. 15. – № 4. – S. 244–250.
8. Gogate P. R. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: a critical review / P. R. Gogate // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Т. 47. – № 4. – S. 515–527.
9. Oleynik O.YU. Metod kontrolya intensifikatsii teplomassoobmennyykh gazozhidkostnykh protsessov vibroakusticheskim metodom / O.YU. Oleynik // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnykh protsesah. – 2018. – Т № 1. – № 43. – S. 43–49.
10. Hovalyig D. Metodyi rascheta gradienta davleniya dvufaznogo potoka pri techenii v malykh kanalah / D. Hovalyig, A. V. Baranenko // Vestnik Mejdunarodnoy akademii holoda. – 2012. – № 1.
11. Boshenyatov B. V. Gidrodinamika mikropuzyrkovykh gazozhidkostnykh sred / B. V. Boshenyatov // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Injining georesursov. – 2005. – Т. 308. – № 6.
12. Karichev Z. R. Rastvorenie v jidkosti dvijushchihysya puzyrkov gaza / Z. R. Karichev, A. L. Muler // Teoreticheskie osnovyi himicheskoy tehnologii. – 2006. – Т. 40. – № 1. – S. 102–105.
13. Taranenko Y.K. Theoretical Basis for Fused-Quartz Resonator Flow Tube Design / Y.K. Taranenko, O.Y. Oliynyk, N.A. Minakova, O.V. Titova // Measurement Techniques. – 2018. – № 61 (3). – P. 314–320.

Рецензія/Peer review : 15.10.2018 р.

Надрукована/Printed :21.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Тараненко Ю.К.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА СВЕРЛ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

*В работе рассмотрено влияние режимов сверления на износ (долговечность) твердосплавных спиральных сверл. В результате проведенных исследований установлено, что износ сверл зависит от подачи, скорости резания и количества просверленных отверстий. При одинаковых условиях обработки до 1200 отверстий износ сверл практически одинаков, с увеличением количества отверстий износ увеличивается.*

*Ключевые слова: сверло, износ, подача, отверстие, скорость резания, печатная плата.*

V. V. STRELBITSKIY

Odessa National Polytechnic University

### RESEARCH OF DRILL WEAROUT IN THE PROCESSING OF HOLES IN PCB

*In electronic equipment, at almost all levels, printed circuit boards (PCB) are widely used. The technological process of their manufacture is complex and multi-operative (about 50 operations), and the most laborious are the drilling and soldering operations. The quality of drilling has a significant impact on the quality of the printed circuit board, and is one of the most critical technological processes. Since the defects formed at the drilling stage, can not only lead to failures, but also increase the cost of products by introducing additional operations into the manufacturing process. The main defect in the drilling of holes is enveloping the filler on the walls of the hole and dragging it beyond the specified geometrical dimensions with the formation of shoulders at the inlet and outlet of the drill. Analysis of the scientific literature and production technology of PP showed that the quality of the drilled holes depends on the base material and foil, tools, equipment and cutting conditions. For research, carbide drills (an analogue of VK 6) with a diameter of 1.5 mm, which were produced in China, were taken. The experiment was carried out on an ICV CNC machine tool, with rigid fixing on the table using tacks (plates) of a package of four 4-layer printed circuit boards of the FR 4 brand. At the first stage, the influence of the cutting speed (rotational speed) on the drill wear on the front and rear surfaces, the transverse edge — with a longitudinal feed  $S = 0.05$  mm / rev and two rotational speeds of 8000 and 12000  $\text{min}^{-1}$  was determined. The holes were drilled through in one pass, without the use of coolant. Measurement of wear was carried out on the transverse edge and on the back surface through every 100 holes using a tool microscope. The experiments were repeated three times, the results were averaged. At the end of the processing cycle, at each of the speeds, the boards were removed and inspected on both sides. The most wear part of the drill when drilling printed circuit boards is the transverse edge. This is due to the fact that the cutting speed depends on the friction force, the latter on the transverse edge exceeds the force at the periphery of the cutting edge of the drill. Non-uniform abrasive wear was observed on the samples, with the intense last on the rear surface significantly exceeding the front. An analysis of the dependence of drill wear on the feed shows that it is non-linear in nature, the effect of the feed is negligible.*

*Keywords: drill, wear, feed, hole, cutting speed, PCB.*

### Постановка проблемы

В радиоэлектронной аппаратуре, практически на всех уровнях, широко применяют печатные платы (ПП). Технологический процесс их изготовления является сложным и многооперационным, причем самыми трудоемкими являются операции сверление.

Качество сверления оказывает существенное влияние на качество печатной платы, и является одним из наиболее ответственных технологических процессов. Поскольку дефекты, образовавшиеся на этапе сверления, могут не только привести к отказам, но и повысить себестоимость изделий за счет введения в процесс изготовления дополнительных операций.

Основными дефектами при сверлении отверстий является наволакивание наполнителя на стенки отверстия и увлечение его за пределы заданных геометрических размеров с образованием буртиков на входе и выходе сверла, образование сколов кромок отверстий на входе и выходе сверла, появление трещин вокруг отверстия. Они образуются вследствие неправильно выбранных геометрических параметров сверла, режимов резания, которые в свою очередь зависят от свойств обрабатываемого материала, диаметра отверстия, глубины сверления, требований к точности и качеству поверхности отверстия.

Поэтому возникла необходимость в более детальном изучении влияния режимов резания на износ сверл при сверлении отверстий в печатных платах.

### Анализ последних публикаций

Анализ научной литературы [1–13] и технологий производства ПП показал, что качество просверленных отверстий зависит от материала основания и фольги, инструмента, оборудования и режимов резания [4]. Поэтому необходимо более тщательно проанализировать сочетание обрабатываемый материал – режимы резания, так как именно оно напрямую влияет на качество и производительность обрабатываемых отверстий [4, 7, 10–12, 13–16].

Сложность процесса сверления отверстий в ПП обусловлена значительной разницей твердостей армирующей основы (НВ 350–500) и полимерной связующей (НВ 40–55), а также сильной температурной зависимостью твердости последней. Поскольку при сверлении инструмент проходит случайным образом расположенные участки материалов, твердость которых различается на порядок, поэтому степень износа инструмента зависит от твердости обрабатываемого материала и углов заточки режущих кромок [4]. Следует отметить, что при сверлении печатных плат подобрать углы заточки невозможно, поскольку



изменение твердости слоев платы носит нелинейный характер [4].

Согласно рекомендациям, которые установлены многократными экспериментами и опытами соответствующих производств, сверла перетачивают через каждое 1000 отверстие, они рассчитаны на 3-4 переточки [1–12].

Поэтому **целью исследования** является изучение влияния подачи и скорости обработки на износ сверл.

### Изложение основного материала

Для исследований были взяты сверла (30 шт.) из твердого сплава (аналог ВК 6) (рис.1, 2) диаметром 1,0 мм, которые произведены в Китае.



Рис. 1. Набор твердосплавных сверл от 0,3 до 1,2 мм

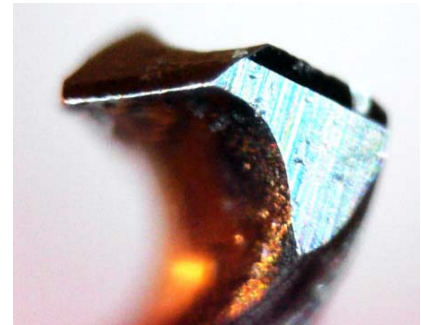


Рис. 2. Заточка сверл (×10)

Эксперимент проводился на станке с ЧПУ ICV, при жестком закреплении на столе с помощью прихватов (пластин) пакета четырех 4-слойных печатных плат из текстолита марки FR 4.

На первом этапе определялось влияние скорости резания (частоты вращения) на износ сверл по передней и задней поверхности, поперечной кромке – при продольной подаче  $S = 0,05$  мм/об и двух значений частоты вращения 8000 и 12000 мин<sup>-1</sup>. Сверление отверстий осуществлялось насквозь в один проход, без применения СОТС.

Измерение износа осуществлялось по поперечной кромке и по задней поверхности через каждые 100 отверстий с помощью инструментального микроскопа. Опыты повторяли трижды, результаты усредняли.

По завершению цикла обработки на каждой из скоростей платы снимали и осматривали с обеих сторон.

Полученные зависимости величины износа сверл от скорости вращения представлены на рис.3, где экспериментальные значения показаны в виде точек, кривые – результаты аппроксимации.

Анализ результатов свидетельствует о нелинейной зависимости износа от скорости резания, причем при одинаковых условиях обработки сверл до 1200 отверстий практически одинаков, с увеличением количества отверстий износ увеличивается.

Наиболее изнашиваемой частью сверла при сверлении печатных плат является поперечная кромка. Это связано с тем, что скорость резания зависит от силы трения, последняя на поперечной кромке превышает силу на периферии режущей кромки сверла. В процессе износа на сверле как бы формируется наиболее благоприятная геометрия вершины инструмента.

На задних поверхностях образцов наблюдался неоднородный абразивный износ, причем интенсивного последнего на задней поверхности значительно превышала по передней. Кроме того, на сверлах, в количестве 5 шт., наблюдался скол поперечной режущей кромки, еще 5 сверл вышли из строя вследствие поломки. Последние можно объяснить хрупкостью материала сверла в совокупности с уводом сверла от оси отверстия и его биения.

Исследования по установлению влияния подачи на износ сверл производили по описанной выше методике, на следующих технологических режимах:  $n=8000$  мин<sup>-1</sup>, в один проход, при следующих значениях подач -  $S = 0,03, 0,05, 0,08$  мм/об. Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Аналогично выглядят зависимости износа по поперечной кромке, поэтому в работе не приводятся.

Анализ зависимостей износа сверл от подачи показывает, что она носит нелинейный характер, влияние подачи незначительно.

Изменение температуры в зоне резания при сверлении отверстий носит циклический характер, нагревание происходит во время сверления отверстия за счет силы трения по задней поверхности сверла, роста температуры в зоне резания, а остывание сверла – при переходе инструмента от отверстия к отверстию. В процессе сверления сверло изнашивается и тупится, за счет чего по мере роста количества отверстий все более нагревается. Все указанное приводит к умягчению связующее композита платы в зоне сверления, его наволакиванию и налипанию на спиральные дорожки сверла, и как следствие, препятствие

остывания сверла в процессе обработки и во время принудительного охлаждения.

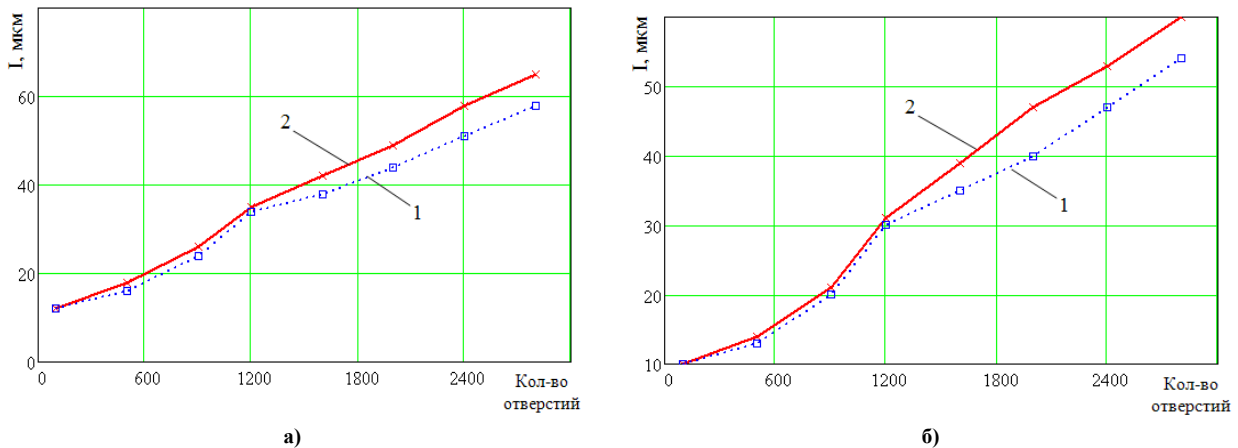


Рис. 3. Зависимость износа сверл по поперечной кромке (а) и задней поверхности (б)  $I$  от количества просверленных отверстий в ПП при частоте вращения шпинделя 8000 (1) и 12000  $\text{min}^{-1}$  (2)

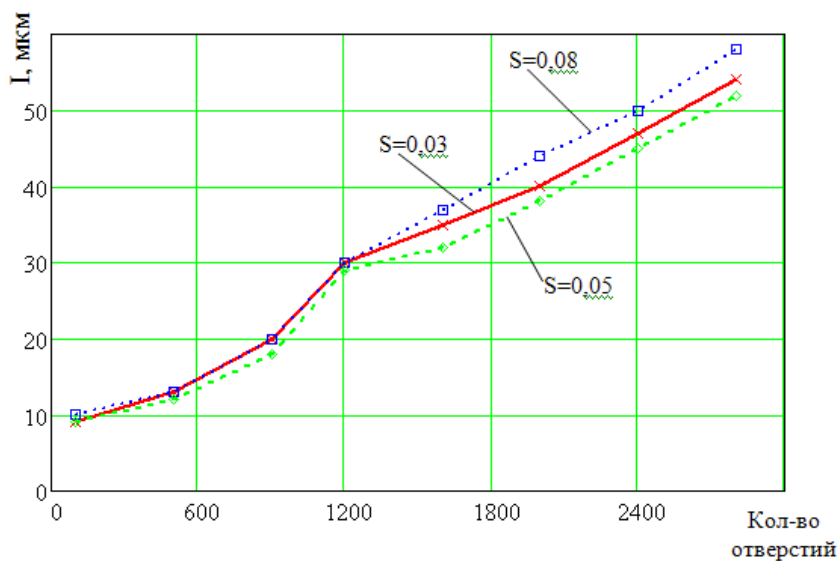


Рис. 4. Зависимость износа сверл по задней поверхности  $I$  от количества просверленных отверстий в ПП и подачи  $S$  мм/об при частоте вращения шпинделя 8000  $\text{min}^{-1}$

При больших значениях подач (0,08 мм/об) визуально наблюдались сколы, вспучивания и отслоения вокруг отверстия на выходе сверла, а при увеличении отверстия в окуляре инструментального микроскопа- увеличение шероховатости.

### Выводы

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что на износ сверл оказывают влияние подача, скорость резания и количество просверленных отверстий в ПП. С увеличением количества отверстий (больше 1200) интенсивность износа сверла возрастает, поэтому возникает необходимость замены или переточки сверл.

Наиболее изнашиваемой частью сверла при сверлении печатных плат является поперечная кромка.

Наибольшее влияние на износ оказывает скорость резания и количество отверстий, в меньшей степени подача.

### Литература

1. Медведев А. М. Печатные платы. Механическое сверление / А. М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2012. – № 8. – С. 74–81.
2. Медведев А.М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2005. – 360 с.
3. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат / М. Махмудов. – М. : Радио и связь, 1986. – 72 с.
4. Юрков Н. К. Технология производства электронных средств : учебн. / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб : Лань, 2014. – 480 с.
5. Arkhipov P.V. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface /



P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // Applied mechanics and materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130.

6. Ванцов С.В. Надежность процесса сверления, понятие отказа / С.В. Ванцов, А.М. Медведев, Зве Маунг Маунг, О.В. Хомутская // Электроника НТБ. – 2016. – № 8. – С. 168–172.

7. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат / Е.В. Пирогова. – М. : Форум: ИНФРА-М, 2005. – 560 с.

8. Optimal organization of tools for machining composites / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // Russian Engineering Research. – 2011. – № 2. – P. 156–157.

9. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и проектирования инструмента / Талантов Н. В. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

10. Жилис В.И. Некоторые основные тенденции развития конструкции и производства спиральных сверл / В.И. Жилис // Станкостроение Литвы : сборник научных трудов. – Вильнюс, 1991. – С. 129–141.

11. Turmanidze R., Adamia D., Amiridze M. Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, № 10-12, 2002, 2 pages.

12. Краткий справочник металлиста / [под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова]. – М. : Машиностроение, 1986. – 960 с

13. Стрельбицкий В. В. Анализ стойкости сверл при обработке отверстий в печатных платах / В. В. Стрельбицкий // Матеріали вісімнадцятої міжнародної науково-техн. конф. "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТП-18-2018), 8–13 червня 2018 р. – Одеса : ОНАЗ, 2018. – С. 167–168.

14. Стрельбицкий В. В. Влияние дефектов крепления блока электронной аппаратуры на вибронпряженность печатных плат / В.В. Стрельбицкий // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012 – № 2. – С. 82–85.

15. Стрельбицкий В.В. Способы снижения вибронпряженности об'єднанных друкованных плат у блоках радиоэлектронной аппаратуры / В.В. Стрельбицкий, А.П. Зинковський // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", 2006. – Вип. 40. – С. 238–241.

16. Стрельбицкий В. В. Дослідження монтажних напружень у паяних конструкціях мікробірок / В.В. Стрельбицкий // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – 2012. – № 2. – С. 42–45.

#### References

1. Medvedev A. M. Pечатnye platy. Mehanicheskoe sverlenie / A. M. Medvedev // Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti – 2012. – № 8. – S. 74–81.

2. Medvedev A.M. Tehnologija proizvodstva pechatnyh plat / A. M. Medvedev – M: Tehnosfera, 2005. – 360 s.

3. Mahmudov M. Mehanicheskaja obrabotka pechatnyh plat / M. Mahmudov – M: Radio i svjaz', 1986. – 72 s.

4. Jurkov, N. K. Tehnologija proizvodstva jelektronnyh sredstv : ucheb. / N. K. Jurkov. – 2-e izd., ispr. i dop. – SPb. : Lan', 2014. – 480 s.

5. Arkhipov P.V. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // Applied mechanics and materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130.

6. Vancov S.V. Nadezhnost' processa sverlenija, ponjatije otказа / S.V. Vancov, A.M. Medvedev, Zve Maung Maung, O.V. Homutskaja // Jelektronika NTB. – 2016. – № 8. – S. 168 – 172.

7. Pirogova, E.V. Proektirovanie i tehnologija pechatnyh plat / E.V. Pirogova. – M.: Forum: INFRA-M, 2005 – 560 s.

8. Optimal organization of tools for machining composites / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // Russian Engineering Research. – 2011. – № 2. – P. 156–157.

9. Talantov N. V. Fizicheskie osnovy processa rezanija, iznashivaniya i proektirovanija instrumenta. – M. : Mashinostroenie, 1992.– 240 s.

10. Zhilis V.I. dr. Nekotorye osnovnye tendenci razvitija konstrukcii i proizvodstva spiral'nyh sverl. Stank ostroenie Litvy, Sbornik nauchnyh tru dov. Vil'njus. – 1991. – S.129–141.

11. Turmanidze R., Adamia D., Amiridze M. Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, № 10-12, 2002, 2 pages.

12. Kratkij spravochnik metallista / pod obshh. red. P. N. Orlova, E. A. Skorohodova. – M.: Mashinostroenie, 1986.– 960 s

13. Strelbitskiy V. V. Analiz stoykosti sverl pri obrabotke otverstij v pechatnyh platah / V. V. Strelbitskiy // Materiali visimnadsyatoї mijnarodnoї nauko-vehn. konf. "Vimiryvalna ta obchislyvalna tehnika v tehnologichnih protsessah" (VOTTP-18-2018), 8–13 chervnya 2018 r. – Odesa : ONAZ, 2018. – S. 167–168.

14. Strelbitskiy V. V. Vliyanie defektov krepneniya bloka elektronnoy apparatury na vibronapryajennost pechatnyh plat / V.V. Strelbitskiy // Vimiryvalna ta obchislyvalna tehnika v tehnologichnih protsessah. – 2012 – № 2. – S. 82–85.

15. Strelbitskiy V.V. Sposoby znyzhennia vibronapryuzhennosti obiednavchykh drukovanykh plat u blokakh radioelektronnoy apparatury / V.V. Strelbitskiy, A.P. Zinkovskiy // Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsessiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. – Lviv : Vyd-vo Nats. un-tu "Lviv. politehnika", 2006. – Vyp. 40. – S. 238–241.

16. Strelbitskiy V. V. Doslidzhennia montazhnykh napruzen u paianykh konstruktsiiah mikrozbirk / V.V. Strelbitskiy // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, seriia: Tekhnichni nauky. – 2012. – № 2. – S. 42–45.

Рецензія/Peer review : 8.10.2018 р.

Надрукована/Printed :21.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-46-49  
УДК 685.341.86

I.Т. СОЛТИК, А.Б. ДОМБРОВСЬКИЙ, Т.А. НАДОПТА  
Хмельницький національний університет

## РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОРТОПЕДИЧНОГО ВЗУТТЯ ДЛЯ ДІТЕЙ ВІКОМ 4,5–10 РОКІВ З ПЛОСКОВАЛЬГУСНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ СТОП

*Найчастіше до центру ортопедії звертаються діти віком від 4,5 до 10 років з плосквальгусними стопами. Тому постає питання проектування й виготовлення ортопедичного взуття для визначеної патології.*

*Ключові слова: плосквальгусна стопа, ортопедичне взуття, проектування, конструкція, дитячі черевики.*

I.T. SOLTYK, A.B. DOMBROVSKYI, T.A. NADOPTA  
Khmelnitskyi National University

### DEVELOPMENT AND DESIGN OF CONSTRUCTION OF ORTHOPEDIC FOOTWEAR FOR CHILDREN AGED 4,5-10 YEARS WITH FLAT-VALGUS DEFORMATION OF FEET

*The child's posture, the development of the musculoskeletal system and, as a consequence, health in the future, depend on the choice of children's shoes. Today, the number of patients requiring orthopedic care is increasing. Most often, children from the age of 4.5 to 10 years with flat-valgus feet are referred to the center of orthopedics. Therefore, the question arises about the design and manufacture of orthopedic footwear for a specific pathology. A successful solution to the problem of designing orthopedic footwear for children aged 4,5-10 years will diversify its assortment. Currently, the Ukrainian footwear market has a lot of good orthopedic footwear of imported production, the prices of which are too high for the average buyer. Therefore, it will be appropriate to make Ukrainian orthopedic footwear of beautiful designs and good quality at the lowest possible prices in order to satisfy the consumer's needs of our buyer. In the article presented on the basis of preliminary experimental data, designed orthopedic boots for children aged 4.5 to 10 years with flat-valgus deformation of feet. Our previous studies made it possible to transform the shape-sizes of the conditional middle foot of the child into the shape-sizes of the pads for children's orthopedic footwear, which were used for the design of special pads and as a result of footwear for a specific pathology. The improved design of children's summer boots for flat-valgus feet for children between 4.5 and 10 years old was designed. The peculiarity of the design is that they are designed for the summer season and have a union with the cut-outs. A soft rib is projected in the upper part of the boot to reduce rubbing from the hard bit.*

*Keywords: flat-valgus foot, orthopedic footwear, design, construction, children's boots.*

**Постановка проблеми.** В результаті обробки заявок, які надходили до Хмельницького центру ортопедії і травматології протягом двох місяців, була визначена група населення області. Встановлено, що найчастіше до лікарів-ортопедів та взуттєвиків звертаються діти віком від 4,5 до 10 років. Заявки цієї групи були досліджені і на їх основі встановлено найрозповсюдженішу деформацію серед дітей, якою виявилась плосквальгусність [1]. Впродовж шести місяців у Хмельницькому центрі ортопедії і травматології разом з лікарем-ортопедом проводились дослідження стоп дітей із цією патологією. Для демонстрації відхилень, які спостерігались у плосквальгусних стопах, визначено умовну середню стопу УСС, довжина якої 185 мм [2]. Параметри стоп дітей оброблялися методами математичної статистики, в результаті чого визначено залежності між основними параметрами.

Успішне вирішення задачі проектування раціональної внутрішньої форми взуття дозволило підвищити точність перетворення форморозмірів умовної середньої стопи в параметри взуттєвої колодки [3]. Нами було спроектовано в автоматизованому режимі берцеву колодку, яка має певні відмінності в порівнянні з колодкою для звичайного взуття того ж розміру [3]. А саме: завищену гомілкову частину та випуклості в місцях зовнішньої і внутрішньої щиколоток.

Тому перед нами постало вирішення питання проектування спеціального взуття, а в результаті виготовлення ортопедичного взуття для дітей віком від 4,5 до 10 років з плосквальгусними стопами.

**Аналіз досліджень та публікацій.** В результаті проведених нами наукових робіт [1-3] виявлено, що використання теоретичних і практичних засад проектування раціонального взуття пов'язано головним чином з дослідженням середньо-типових стоп і застосуванням при обробці результатів випробувань методів математичного аналізу. Успішне вирішення задачі проектування раціональної внутрішньої форми взуття в значній мірі пов'язано з питаннями перетворення форморозмірів умовної середньої стопи дитини (УССд) в параметри взуттєвої колодки. На основі раніше встановлених в роботі [1] даних, досліджували цифрову модель УССд і створювали її геометричний образ із допомогою дискретно-цифрового і геометричного представлення інформації про поверхню стопи [2].

Були отримані контури поперечних і повздовжніх перерізів берцевої колодки, габариту і відбитка, які апроксимовані з допомогою одного із відомих контактних методів [3].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Для проектування ортопедичного взуття потрібна розробка принципово нової схеми дослідження

стоп з різним ступенем патології, яка повинна враховувати і медичні аспекти призначення й технічне рішення виконання, зокрема процес проектування і виготовлення ортопедичного взуття. Успішне вирішення задачі проектування ортопедичного взуття для дітей віком 4,5–10 років дозволить урізноманітнити його асортимент. В даний час на ринку взуття є багато гарного ортопедичного взуття імпортного виробництва, ціни на яке досить часто занадто високі для середньостатистичного покупця. Тому буде доречним виготовляти українське ортопедичне взуття гарних конструкцій та хорошої якості за меншими цінами, щоб задовольнити споживчі потреби нашого споживача. Оскільки в попередніх наших статтях були проведені дослідження плосковальгусних стоп дітей віком від 4,5 до 10 років [1], встановлено залежності між параметрами УССд [2] і перетворено їх в параметри спеціальної взуттєвої колодки [3], то невирішеною частиною нашої роботи стає проектування спеціального дитячого взуття з вказаною патологією стоп.

#### Постановка завдання

В роботах [1–3] були визначені перспективи досліджень дітей з плосковальгусними стопами з метою проектування спеціальної колодки та, як наслідок, проектування ортопедичного взуття. Тому завданням даної роботи є проектування ортопедичного взуття для дітей віком від 4,5 до 10 років з плосковальгусними стопами на основі створеної нами раніше цифрової моделі і геометричного образу УССд, форморозміри яких перетворено у параметри колодки.

#### Результати досліджень

Для того щоб ортопедичне взуття виконувало функції за своїм призначенням, в ньому обов'язково повинні бути такі елементи: легка гнучка підошва з захистом від ковзання; жорсткий високий задник для хорошої фіксації п'ятки; невисокий широкий каблучок; широкий носок, щоб пальчики вільно розташовувалися всередині; зручні застібки з можливістю регулювати їх з урахуванням ширини і підйому ніжки.

Є ще одна важлива частина ортопедичного взуття, устілка. Вона для плосковальгусної стопи має бути з супінатором, щоб підтримувати зведення стопи.

Лікувальне взуття додатково має високий задник, який закриває гомілковостопний суглоб, і за рахунок особливої будови забезпечує три точки опори – для п'ятки, зовнішньої і внутрішньої частин стопи.

Нами було спроектовано в автоматизованому середовищі AutoCAD дитячі ортопедичні черевики з настроченими берцями і відкритим носком клейового методу кріплення з висотою припіднятості п'яркової частини 10 мм, закріплення його на стопі за допомогою шнурівки; індекс колодки для проектування деталей верху і низу взуття 6312-ОД, розмір спроектованого взуття 185, повнота – 2. При проектуванні ми керувалися вимогами стандарту, у відповідності з яким виготовляється взуття, а саме ДСТУ ГОСТ 26165:2009 [5]. Ескіз спроектованих черевиків наведено на рис. 1.



Рис. 1. Дитячі ортопедичні черевики з настроченими берцями і відкритою носковою частиною

Особливістю конструкції ортопедичних дитячих черевиків є те, що вони призначені для літнього сезону і мають союзку з вирізами та відкритою носковою частиною, берці настрочуються на союзку, яка не має язичка. Роль задника відіграє жорсткий берець, який має й іншу функцію – підтримка гомілковостопного суглоба стопи, надання цій частині взуття жорсткості.

У верхній частині берця проектується м'який кант, щоб зменшити натирання від жорсткого берця.

Деталі підкладки виготовляються з натуральної шкіри, для покращення гігієнічних властивостей взуття. На берцях проектується три пари блочок і на союзці роблять отвори, для того, щоб стопа дитини більше дихала.

Складання заготовки черевика з настроченими берцями умовно можна поділити на такі основні етапи:

1. Складання вузла берців.
2. Складання вузла союзки.
3. Кінцеве складання заготовки.

Під час кінцевого складання вузол союзки вкладають у вузол берців, зісточують, обов'язково виконуючи на берцях закріпку.

При складанні взуття до верхньої устілки приклеюють викладку склепіння, яка заповнює простір в геленковій частині колодки.

Вдосконалена конструкція взуття повністю задовольняє всі вимоги, і навіть враховує літній сезон, під час якого стопа особливо багато виділяє вологи.

Спеціальними деталями для взуття з плосковальгусним склепінням є жорсткий берець та викладка

склепіння.

Викладка склепіння може займати різне положення і розміщуватись в п'ятково-геленковій частині, а іноді і пучковій частині. В нашому випадку викладка склепіння буде розміщуватися в п'ятково-геленковій частині, так як сплюснене повздожне склепіння спостерігається у вальгусному положенні стопи.

Взуття з викладкою склепіння виготовляється таким чином, щоб була можливою деяка зміна форми викладки при підгонці.

Викладка склепіння розміщується і приклеюється до верхньої устілки, і при необхідності може вийматись і корегуватись.

У такому взутті навантаження сприймається не тільки пучковою частиною та каблучною, а й геленковою, головним чином по внутрішньому її краю. Для зміщення геленкової частини використовують геленок або спеціальні каблучки.

Розміщується викладка склепіння по наміткам, які роблять на устілці.

Засобом для розвантаження плосковальгусних стоп є викладка склепіння. Для попередження прогресування статичної недостатності стопи, рівномірного розподілення навантаження по її плантарній поверхні, зняття больових відчуттів і покращення опорно-динамічної і амортизаційної функції є досить переконливі аргументи на користь своєчасного постачання носіїв раціонального взуття, а при необхідності – вкладної ортопедичної устілки. Так як для плосковальгусної стопи недостатньо лише використання вкладної ортопедичної устілки, то виготовляють спеціальне ортопедичне взуття, в якому є жорсткі берці і замість устілки ортопедичної проєктують викладку склепіння.

Викладку склепіння проєктують відносно контуру вкладної устілки та відносно контуру відбитка ступні з плосковальгусними відхиленнями.

Автоматизоване проєктування викладки склепіння в AutoCAD значно полегшує проєктування і дозволяє на основі контуру вкладної устілки проєктувати викладку для різних стадій плоскостопості, різної конфігурації. Процес проєктування включає розробку конструкції викладки, визначеного розміру і форми, а також місце розташування на устілці.

Індивідуальна плантограма стопи хворого (УСС) вводиться в комп'ютер з допомогою сканера. Зображення індивідуальної плантограми стопи по чергово накладається на контури усереднених плантограм, які є на одному із шарів у файлі AutoCAD (файл містить плантограми стоп різного розміру та зображеними на них викладками склепіння для різних деформацій), і порівнюється для визначеної патології на різних ділянках стопи, в нашому випадку на ділянках  $0,18-0,68D_{ст}$  та на ділянці  $0,5-1,0D_{ст}$ . Далі в AutoCAD будують поперечні перерізи викладення склепіння. На рис. 2 показано спроєктоване викладення склепіння і поперечні перерізи у визначених місцях.

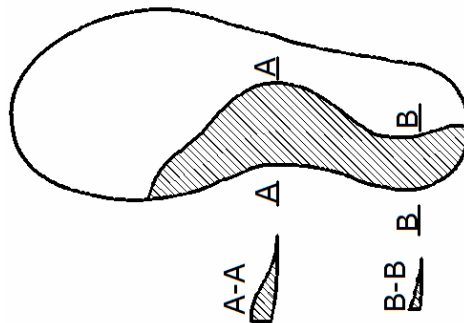


Рис. 2. Проєктування викладення склепіння і його поперечні перерізи

Черевики з жорсткими берцями виготовляються на спеціальних берцевих колодках. Жорсткі берці зменшують гнучкість взуття, ускладнюється його надівання, тому використовують і проєктують взуття такої конструкції, яка дозволяє широко розкриватись, в нашому випадку це літні черевики з настроченими берцями та союзкою, яка має вирізи.

Берець проєктується круговий, який на кресленні буде мати лінію перегину, і потім буде відформований на колодці. Матеріалом для нього краще взяти шкіру натуральну.

В такому взутті спостерігається ковзання стопи, тому можна в пучковій частині на вкладній устілці передбачити виступ.

Жорсткий берець зміцнює задник і проєктується подібно йому тільки вищим, відносно контуру колодки та деталей вершу.

Відформований берець має випуклості для щиколоток, щоб зменшити натирання стопи.

В основі проєктування деталей вершу черевиків дитячих лежить умовна розгортка колодки (УРК), вписана в осі координат. Модель проєктується за копіювально-графічною системою моделювання взуття.

Для нанесення базисних ліній проводимо допоміжні осі координат  $X'O_1$  та  $Y'O_1$ . Положення базисних та допоміжних ліній визначають за копіювально-графічною методикою [4].

Побудова креслення зовнішніх деталей вершу черевика з настроченими берцями включає в себе проєктування двох конструктивних вузлів: п'яткового – берців черевика та переднього – союзки.

У верхній частині берців проєктується м'який кант, який має лінію перегину по задньому шву.

З урахуванням конструктивної особливості визначається положення точки союзи та її лінії перегину.

Остаточний вигляд креслення зовнішніх деталей вершу зображено на рис. 3.

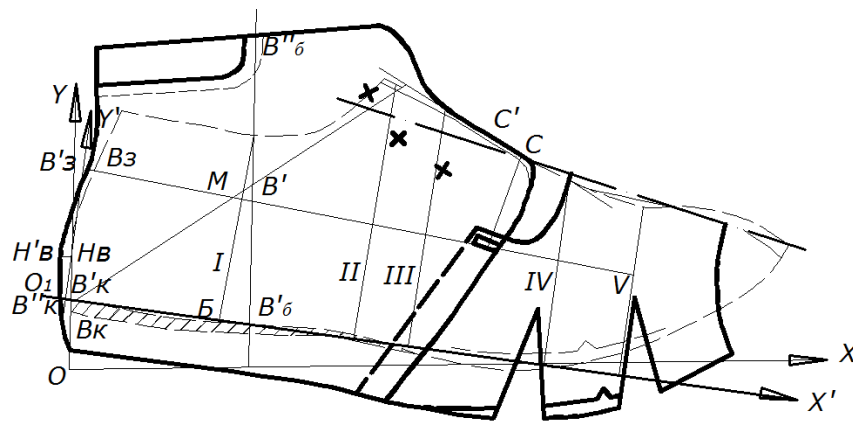


Рис. 3. Проектування зовнішніх деталей вершу черевиків дитячих з настроченими берцями

Далі проектується за загальноприйнятою методикою внутрішні та проміжні деталі вершу дитячих черевиків. Основою для проектування деталей підкладки служить контур зовнішніх деталей вершу без припуску на обробку. Проміжною деталлю літніх відкритих черевиків є жорсткий задник.

#### Висновки

Проведені нами попередні дослідження дали змогу перетворити форморозміри УССд в форморозміри колодок для дитячого ортопедичного взуття, які були використані для проектування спеціальних колодок і в результаті взуття для визначеної патології. Спроековано вдосконалену конструкцію дитячих літніх черевиків для плосковальгусних стоп дітей віком 4,5–10 років.

#### Література

1. Домбровський А.Б. Дослідження плоско-вальгусних стоп дітей віком 4,5–10 років з метою проектування спеціальних колодок / А. Б. Домбровський, І. Т. Солтик // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* – 2014. – № 6. – С. 101–107.
2. Солтик І.Т. Цифрова модель і геометричний образ умовної середньої плоско-вальгусної стопи дітей віком 4,5-10 років / І. Т. Солтик // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* – 2015. – № 6. – С. 111–115.
3. Солтик І.Т. Розрахунок та автоматизоване проектування колодок для дітей віком 4,5-10 років з плоско-вальгусною деформацією стоп / І.Т. Солтик, А.Б. Домбровський // *Вісник КНУТД.* – 2017. – № 5. – С. 166–172.
4. Кочеткова Т.С. Антропологические и биомеханические основы конструирования изделий из кожи : учебник для вузов / Т.С. Кочеткова, В.М. Ключникова. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 190 с.
5. Взуття дитяче. Загальні технічні умови. ДСТУ ГОСТ 26165:2009. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 26 с.

#### References

1. Dombrovskiy A.B. Doslidzhennja plosko-valjghusnykh stop ditej vikom 4,5–10 rokov z metoju proektuvannja specialnykh kolodok / A.B.Dombrovskiy, I. T. Soltyk // *Visnyk Khmeljnycjkogho nacionaljnogho universytetu. Tekhnichni nauky.* - 2014. - № 6. - p. 101-107. [in Ukrainian]
2. Soltyk I.T. Tsyfrova model i heometrychnyj obraz umovnoi serednoi plosko-valhusnoi stopy ditej vikom 4,5-10 rokov / I. T. Soltyk // *Visnyk Khmeljnycjkogho nacionaljnogho universytetu. Tekhnichni nauky.* - 2015. - №6. - p. 111-115. [in Ukrainian]
3. Soltyk I.T., Dombrovskiy A.B. Rozrakhunok ta avtomatyzovane proektuvannja kolodok dlia ditej vikom 4,5-10 rokov z plosko-valhusnoiu deformatsiieiu stop. – *Visnyk KNUVD.* -2017. - №5. - p. 166-172. [in Ukrainian]
4. Kochetkova T.S. Antropologicheskie i biomechanicheskie osnovy konstruirovaniya izdeliy iz kozhi / T.S. Kochetkova, V.M. Klyuchnikova – *Uchebnik dlya vuzov.* – М.: Legprombytizdat, 1991. – 190 pp. [in Russian]
5. DSTU HOST 26165:2009. Vzuttia dytiache. Zahalni tekhnichni umovy. – К.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. – 26 pp. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 24.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.

Рецензент: к.т.н., доц. О.А. Михайловська

Н.В. МИХАЙЛОВА

Східноукраїнський національний університет ім. В. Дала, м. Сєвєродонецьк

В.О. ПРИВАЛА

Хмельницький національний університет

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ І ОЦІНКИ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЕЦІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗОЛЮЮЧОГО КОСТЮМА ПРАЦІВНИКІВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*В статті проаналізовано різні підходи до вибору показників для вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів, які використовують під час виготовлення захисного одягу працівників вітчизняної хімічної промисловості. Запропоновано класифікацію методів оцінки властивостей спеціальних матеріалів, використання якої дозволяє значно підвищити якість досліджень на етапі проектування спеціального одягу.*

*Ключові слова: хімічна промисловість, закриті ємності, умови праці, захисний одяг, шкідливі умови, агресивне середовище, безпека життя.*

N.V. MIHAILOVA

Volodymyr Dahl Eastern National University, Severodonetsk

V.O. PRIVALA

Khmelnyskyi National University

## RATIONALE FOR CHOICE OF INDICATORS FOR STUDY AND EVALUATION OF PROTECTIVE PROPERTIES OF SPECIAL MATERIALS OF INSULATING COSTUME OF WORKERS OF CHEMICAL INDUSTRY

*Creation of effective PPE (personal protective equipment), namely those that would meet the requirements of specific industries, largely depends on the quality of used materials and components. It is known that quality is a collection of properties of an object that determines its suitability for purpose. Therefore, in practice, researchers share the quality indices for general, basic and secondary, that is, additional, which are considered as optional, but give an opportunity to evaluate the product used for its intended purpose. The authors of work proposed a scheme of methodical approach to the process of selecting materials PPE, which is based on the classification of methods (known and possible) to study the required characteristics. In this classification, the division into classes is performed at the levels of significance of those properties and indicators of materials, which, as practice confirms, are essential in deciding whether to create a future product; on subclasses - on properties of materials; on groups - on the types of investigated private and general characteristics, and on subgroups - on the criteria laid down in the basis of assessment of specific properties. In this regard, the methods are divided into two classes - protective and hygienic, which are divided into two subclasses. Each of the subclasses in turn is divided into groups depending on the variety of determined indicators, which should be selected taking into account the purpose of the product, physical and mechanical properties of the materials and characteristics of the NWFP.*

*Key words: chemical industry, closed capacities, safety of life, aggressive environment, working conditions, protective clothing, harmful conditions.*

### Вступ

Створення ефективних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), а саме таких, які відповідали б вимогам конкретних виробництв, багато в чому залежить від якості використовуваних матеріалів і комплектуючих деталей. Відомо [1], що якість – це сукупність властивостей об'єкта, які обумовлюють його придатність відповідно до призначення. Тому на практиці, дослідники поділяють показники якості на загальні, основні і другорядні, тобто додаткові, які розглядаються як необов'язкові, проте дають можливість оцінити застосовується виріб за призначенням. Як приклад, можна навести текстильні матеріали, що застосовуються для виготовлення святкового жіночого легкого плаття і робочого халата, що захищає від механічних впливів. У цій конкретній ситуації очевидно, що показники оцінки будуть відрізнятися і їх перелік визначений, в першу чергу, призначенням виробу. Тому, якщо основними фізико-механічними характеристиками для матеріалу робочого халата можуть бути розривні, стійкість до стирання по площині, усадка після прання, паро- і повітропроникність, тобто такі, за допомогою яких застосування матеріалу для виготовлення робочого халата буде обгрунтованим. Що ж стосується текстильного матеріалу для жіночого плаття, то з урахуванням призначення, експериментатору досить вивчити такі показники як стійкість до розсування ниток, пряжі по основі і пітканню, їх обсіпальність, утворення пілінгу, або, наприклад, міцність закріплення ворсу тощо. На підставі аналізу вивчених показників, особливо їх зміни від впливу певних факторів, проведуть вибір того чи іншого необхідного матеріалу.

### Постановка задачі

Існуюча схема методичного забезпечення досліджень проста і має широке поширення для швейних виробів побутового призначення, оскільки задоволення одних тільки художньо-естетичних вимог може бути досить для вирішення проблем конкретного індивідуума. Якщо ж мати на увазі ЗІЗ, наприклад, спеціальну кислотозахисний одяг, то текстильні матеріали, що застосовуються для його виготовлення, розподілено на групи, в залежності від показників якості. Такий стан речей, який можна віднести до недоліків існуючих нормативних документів, було ретельно проаналізовано в роботі [2] і на основі проведених досліджень запропонована логічна схема класифікації методів оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для засобів індивідуального захисту. Наприклад, в ГОСТ 12.4.058-84. ССБТ. «Материалы с полимерным покрытием для специальной

одежды. Номенклатура показателей качества» [3] показники якості поділені за призначенням, технологічністю і гігієнічними показниками. Застосування зазначених показників якості рекомендовані тільки у певних областях використання і відповідно до класифікаційними угрупованнями. А якщо врахувати той факт, що спеціальні матеріали для спеціального одягу повинні одночасно захищати від декількох факторів (наприклад, підвищених температур і розчинів мінеральних кислот), то діюча номенклатура показників якості є малоінформативною.

На відміну від розглянутого стандарту [3], в ГОСТ [4], а також в ГОСТ [5], показники якості, аналогічно, як і в [6, 7], поділяються на загальні (що застосовуються для всіх класифікаційних груп) і на спеціалізовані, тобто додаткові [6], які застосовуються для деяких окремих груп і підгруп. Якщо врахувати анізотропію властивостей текстильних матеріалів та їх взаємозв'язки, особливо в процесі впливу агресивних середовищ, а також той факт, що за допомогою, наприклад, величини розривного навантаження, яка віднесена до загальних показників [5] оцінюється хімічна стійкість досліджуваної проби, тобто це вже спеціалізований показник, то стає очевидним, що їх розподіл має бути обґрунтованим і доцільним. Разом з цим слід зазначити, що аналіз умов праці, характеристика небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) конкретного підприємства, а також вивчення топографії зносу існуючих ЗІЗ, їх недоліків за захисними властивостями і інше, є тією необхідною (а в більшості випадків і достатньою) інформацією для розробки вихідних вимог на нову продукцію, а відповідно до умов стандарту [8] одночасно визначати номенклатуру таких показників, за допомогою яких буде реальна можливість її вивчити і оцінити. Особливість такого підходу до вирішення проблеми важлива тоді, коли процес створення ЗІЗ починається з розробки принципово нового спеціального матеріалу. Якщо ж ЗІЗ буде виготовлятися з матеріалів існуючого асортименту, то в цьому випадку необхідна постановка задачі оптимального їх вибору для заданих умов експлуатації, на що справедливо вказується в роботах [9–11].

#### Викладення основного матеріалу

Відповідність спеціальних матеріалів призначенню визначається за допомогою диференціального, комплексного та змішаного (комбінованого) методу оцінки рівня якості [1]. При диференціальному методі зіставляються одиничні показники оцінюваної продукції з одиничними базовими показниками.

При комплексному методі оцінки рівня якості продукції використовується узагальнений показник якості. Застосування цього методу дозволяє визначити одну оцінку як підсумкову за рядом показників якості продукції, яку оцінюють. Для визначення узагальненого показника всі показники якості переводять в безрозмірні, визначають їхню соціальну значимість (вагомість) і за відомими формулами проводять обчислення. Недолік такого методу є те, що він не дає повного уявлення про окремі властивості продукції і не виключає можливість компенсації одного показника іншими.

При змішаному (комбінованому) методі, окремі показники якості об'єднуються в групи, з наступним визначенням комплексних показників на підставі яких диференціальним методом оцінюють рівень якості.

Практичне застосування зазначених методів оцінки рівня якості показало, що при розробці спеціального, наприклад, кислотозахисного одягу виникають такі серйозні труднощі як вибір базових показників і визначення коефіцієнта їх значимості. Так, згідно зі стандартами [12, 13, 14], напіввовняна тканина і тканина з хімічних волокон та їх сумішей з бавовною характеризуються за допомогою двох показників: кислотостійкістю і кислотопроникненням, а бавовняні тканини [13] тільки кислотопроникненням, що і є недоліком діючих нормативних документів.

У зв'язку з цим автори роботи [15] запропонували схему методичного підходу до процесу вибору матеріалів для ЗІЗ, в основу якого покладена класифікація методів (існуючих і можливих) з вивчення необхідних характеристик. У даній класифікації поділ на класи виконано на рівнях значущості тих властивостей і показників матеріалів, які, як підтверджує практика, є основними при вирішенні доцільності створення майбутнього виробу; на підкласи – за властивостями матеріалів; на групи – за різновидами досліджуваних окремих і загальних характеристик, а на підгрупи – за критеріями, покладеними в основу оцінки конкретних властивостей. У зв'язку з цим методи розділені на два класи – захисні і гігієнічні, які розділені на два підкласи. Кожен з підкласів в свою чергу ділять на групи залежно від різновиду показників, які повинні вибиратися з урахуванням призначення виробу, фізико-механічних властивостей матеріалів і характеристики шкідливих виробничих факторів. Тому, в якості критеріїв оцінки об'єднаних в підгрупу, можуть бути наступні: час проникності  $t_n$ , коефіцієнт проникності  $Q_n$ , температура руйнування  $T_r$ , час руйнування при заданій температурі  $trT$ , час досягнення гранично-допустимої температури на контрольованій поверхні проби при заданому градієнті температури  $tT$ , розривне навантаження  $P_r$ , подовження при розриві  $l_r$ , жорсткість  $D$ , стійкість до багаторазового згину  $N_p$ , швидкість стирання  $V_n$ , довговічність і повзучість в умовах впливу шкідливих факторів (конкретних) при постійному заданому напрямку  $tr$  і показники вологообміну властивостей  $W$ ,  $G$ ,  $W_o$ , паропроникність  $A_p$ , повітропроникність  $B$ , коефіцієнт зміни, наприклад, механічних показників  $K_d$ ,  $p$ ,  $KN$ ,  $KV$  і гігієнічних показників  $K_g$ . Запропоновані критерії оцінок фізико-механічних, захисних та гігієнічних показників матеріалів для ЗІЗ і готових виробів можуть бути об'єднані загальним показником  $K_e$  (рис. 1).

#### Висновки

Таким чином, проведені аналітичні дослідження зазначених нормативних документів та наукових робіт показують, що вирішення проблеми розробки спеціальних захисних виробів, особливо ізолюючого типу, вивчення властивостей матеріалів, послідовність проведення експериментів, критерії оцінок та інше, повинні бути науково-обґрунтованими, тобто критерії оцінок повинні підкорятися головній комплексній методичній основі, що складається з набору другорядних, але не менш відповідальних завдань. Саме для розв'язання цієї задачі і запропоновано класифікацію методів оцінки властивостей спеціальних матеріалів для ЗІЗ.

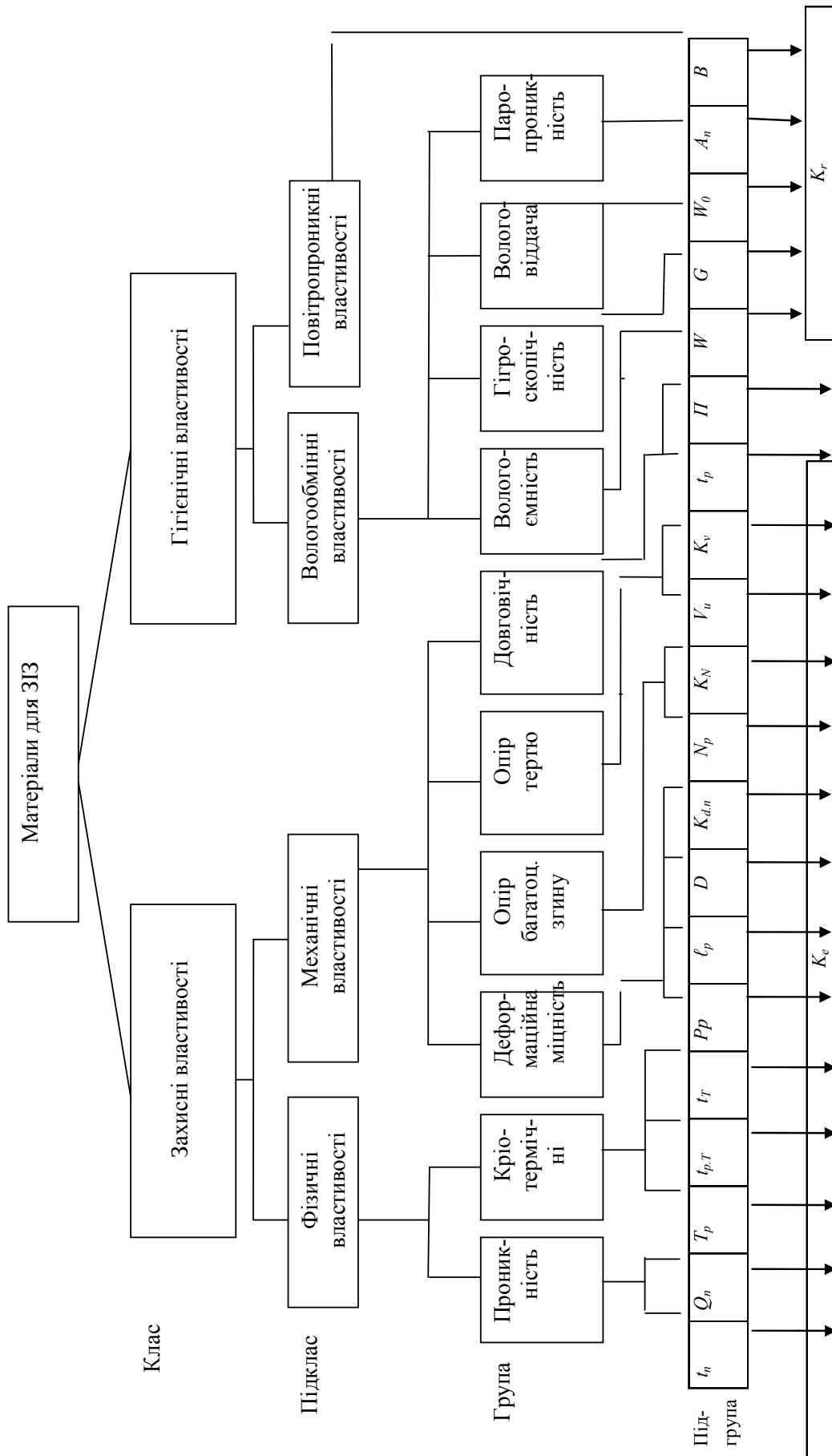


Рис. 1. Класифікація методів оцінки властивостей спеціальних матеріалів для ЗІЗ



## Література

1. Управление качеством продукции : ГОСТ 15467-79 (СТ СЭВ 3519-81). – [Взамен ГОСТ 15467-70, ГОСТ 16431-70, ГОСТ 17341-71, ГОСТ 17102-71. Введ. 01.07.79]. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 28 с.
2. Мичко А. А. Разработка методов оценки защитных свойств и выбора текстильных материалов для специальных изделий в экстремальных условиях : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.01 / Мичко А. А. – СПб, 1997. – 394 с.
3. Материалы с полимерным покрытием для специальной одежды. Номенклатура показателей качества : ГОСТ 12.4.058-84. ССБТ. – [Взамен ГОСТ 12.4.058-78. Введ. 01.07.85]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
4. Одежда специальная защитная. Номенклатура показателей качества : ГОСТ 12.4.016-83. ССБТ. – [Взамен ГОСТ 12.4.016-75. Введ. 01.07.84]. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 4 с.
5. Материалы для средств защиты рук. Номенклатура показателей качества : ГОСТ 12.4.069-79. ССБТ. – [Введ. 01.01.71]. – М. : Изд-во стандартов, 1971. – 4 с.
6. Коляденко С.С. Товароведение текстильных товаров / Коляденко С.С., Месяченко В.Т., Кокошинская В.И. – Москва : Экономика, 1981. – 320 с.
7. Стельмашенко В.И. Материаловедение швейного производства / Стельмашенко В.И., Розаренова Т.В. – Москва : Легпромбытиздат, 1987. – 224 с.
8. Система разработки и постановки продукции на производство. Средства индивидуальной защиты : ГОСТ 15.004-88. – [Введ. 01.01.89]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 13 с.
9. Романов В.Е. Системный подход к проектированию специальной одежды / Романов В.Е. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 128 с.
10. Романов В.Е. Экспертная оценка весомости свойств спецодежды / В.Е. Романов // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 1978. – № 5. – С. 16–20.
11. Романов В.Е. Построение комплексного критерия качества кислотозащитной спецодежды / В.Е. Романов // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 1978. – № 6. – С. 87–92.
12. Ткани полшерстяные для кислотозащитной спецодежды. Технические условия : ГОСТ 16166-80. – [Взамен ГОСТ 16166-70. Введ. 01.01.82]. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.
13. Ткани хлопчатобумажные и смешанные для спецодежды : ГОСТ 11209-85. – [Взамен ГОСТ 11209-72. Введ. 01.07.86]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.
14. Ткани из химических волокон и их смесей с хлопком с кислотоотталкивающей пропиткой для спецодежды. Технические условия : ОСТ 17-345-85. – [Введ. 01.01.85]. – Калинин : ЦНИИШВ, 1984. – 6 с.
15. Мычко А.А. Системный подход к проблеме выбора материалов для средств индивидуальной защиты / А.А. Мычко, В.И. Очкуренко // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 1988. – № 1. – С. 26–30.

## References

1. GOST 15467-79 (ST SEV 3519-81). Product quality management. In exchange GOST 15467-70, GOST 16431-70, GOST 17341-71, GOST 17102-71; Enter. 07/01/79. - Moscow: Publishing Standards, 1987. - 28 pp.
2. Mychko AA Development of methods for assessing protective properties and selection of textile materials for special products under extreme conditions. : dis. Doct. tech. Sciences: 05.19.01.- / Mychko AA - St. Petersburg, 1997. - 394 p.
3. GOST 12.4.058-84. SSBT. Materials with polymer coating for special clothes. Nomenclature of quality indicators. In exchange for GOST 12.4.058-78; Enter. 01/07/85. - Moscow: Publishing Standards, 1985. - 8 p.
4. GOST 12.4.016-83. SSBT. Special protective clothing. Nomenclature of quality indicators. In exchange for GOST 12.4.016-75; Enter. 01/07/84. - Moscow: Izd-vo standards, 1984. - 4 p.
5. GOST 12.4.069-79. SSBT. Materials for hand protection. Nomenclature of quality indicators. Enter. 01/01/71. - Moscow: Publishing Standards, 1971. - 4 pp.
6. Kolyadenko S.S. Merchandising of Textile Goods / Kolyadenko SS, Mesyachenko VT, Kokoshinskaya VI - Moscow: Economics, 1981. - 320 p.
7. Stelmashenko V.I. Material science of sewing production / Stelmashenko VI, Rozarenova TV .. - Moscow: Legprombytizdat, 1987. - 224 p.
8. GOST 15.004-88. System for the development and production of products for production. Individual protection means. Enter. 01/01/1969. - Moscow: Izd-vo standards, 1988. - 13 p.
9. Romanov V.E. The system approach to the design of special clothing / Romanov V.E. - Moscow: Light and food industry, 1981. - 128 p.
10. Romanov V.E. Expert evaluation of the weight of the properties of overalls / Romanov V.E. // Izvestiya VUZ. Technology of light industry. - 1978. - №5. - P. 16-20.
11. Romanov V.E. Construction of a complex criterion for the quality of acid-protective overalls / Romanov V.E. // Proceedings of universities. Technology of light industry. - 1978. - № 6. - P. 87-92.
12. GOST 16166-80. Wool fabrics for acid-protective overalls. Technical conditions. - In exchange for GOST 16166-70; Introduction. 01.01.82. - M.: Publishing Standards, 1980. - 7 pp.
13. GOST 11209-85. Cotton fabrics and mixed for overalls. - In exchange for GOST 11209-72; Enter. 01/07/86. - Moscow: Publishing Standards, 1985. - 13 pp.
14. OST 17-345-85. Fabrics made of chemical fibers and their mixtures with cotton with acid-repellent impregnation for overalls. Technical conditions. Enter. 01/01/85. - Kalinin. TsNIISHV. 1984. - 6 with.
15. Mychko A.A. A systematic approach to the problem of choosing materials for personal protective equipment / Mychko AA, Ochurenko VI, // Proceedings of universities. Technology of light industry. - 1988. - №1. - P. 26-30.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Карван С.А.

## ДІЯ ВОДИ ТА ЕЛЕКТРОЛІТІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ШКІРЯНОГО ПЕРГАМЕНТУ

*В роботі досліджено вплив дії води та електролітів на властивості шкіряного пергаменту різних способів виготовлення. Експериментально встановлено, що найстійкішими до дії води та електролітів є зразки пергаменту-транспаранту, отриманого шляхом сульфідно-вапняного зоління та пергаменту, одержаного шляхом двостадійного зоління з меншою витратою гідроксиду кальцію. Отримані результати дослідження будуть враховані під час вдосконалення існуючих чи розроблення нових способів виготовлення даного біогенного матеріалу.*

*Ключові слова:* шкіряне виробництво, пергамент, електроліти, властивості.

T.O. KOLESNYK, O.A. ANDREYEVA, A.V. NIKONOVA  
Kyiv National University of Technologies and Design

## THE INFLUENCE OF WATER AND ELECTROLYTES ON THE PROPERTIES OF LEATHER PARCHMENT

*Parchment is a unique material of biogenic origin, which has extraordinary durability strength and preservation due to its structure and properties. Thus a significant part of the historical monuments in the form of books and manuscript, which made from this type of leather, came to us in good condition. However, the parchment is a hygroscopic material, when the humidity is changes, he absorbs and desorbs moisture many times, which results in significant deformation and distortion, and which in turn due negative effect on its integrity and preservation. Therefore, in order to improve the producing technique, to expand the possibilities of using and preserving this specific material, it is important to be aware of the change in its properties under different conditions. In view of the above, the influence of distilled water and electrolytes on the properties of leather parchment was investigate in this work. As an object of investigation, the process of changing the properties of this leather material are consider, as subject a relationship of these changes to the nature and concentration of used reagents. As investigated materials, samples of parchment, obtained from sheep's raw material by several known methods were use: parchment for writing by the modern method, parchment for restoration by the modern method, transparency-parchment according to the ancient method, parchment for general purpose. As electrolytes used chloride and sulphuric acid, potassium hydroxide, sodium chloride and ammonium sulphate in a 0.2 and 2.0 N solution. It have been experimentally established that the most resistant to the action of water and electrolytes are samples of the parchment-transparent, obtained by sulphide-lime liming and the parchment obtained by two-stage liming with less consumption of calcium hydroxide. The obtained results of the research will be take into account in improving of existing or developing of new methods production of this biogenic material.*

*Keywords:* leather production, parchment, electrolytes, properties.

### Вступ

Пергамент є унікальним біогенним матеріалом, який одержують переважно зі шкур молодих телят, овець та кіз без дублення за рахунок проведення відмочувально-зольних та низки оздоблювальних процесів та операцій. Це один із найбільш стародавніх видів натуральної шкіри, який традиційно застосовували для письма, музичних інструментів, деяких деталей машин тощо [1, 2]. З винаходом нових матеріалів, розробкою нових технологій попит на шкіряний пергамент почав зникати. Разом з тим, у багатьох музеях та колекціях знаходиться чимало дорогоцінних експонатів-раритетів на пергаментній основі, які необхідно зберегти для нащадків. Тому так багато досліджень [3–5] присвячено проблемі збереження та реставрації пергаменту. Слід зазначити, що у наш час стає все більш престижним мати оригінальні прикраси, писемні документи, предмети інтер'єру зі шкіряного пергаменту. Але, на жаль, дуже мало інформації щодо розробки нових або удосконалення існуючих способів виготовлення пергаменту, вивчення його поведінки за різних умов. Саме у цьому напрямі працюють автори, намагаючись проаналізувати відомі технології та матеріали для виготовлення пергаменту, спрогнозувати його властивості при дії різноманітних чинників [6, 7].

Оскільки під час експлуатації та зберігання цілісність і властивості пергаменту значною мірою залежать і від застосованих хімічних реагентів, метою даної роботи стало дослідження поведінки пергаменту при дії води, а також електролітів різної природи та концентрації. В якості об'єкту дослідження розглянуто процес зміни властивостей даного шкіряного матеріалу, а предмету – взаємозв'язок цих змін з природою та концентрацією реагентів.

### Експериментальна частина

У роботі використано зразки пергаменту, виготовленого з овчини за різними способами: *група 1* – за сучасним способом виготовлення пергаменту для письма з використанням двостадійного вапняного зоління при меншій витраті гідроксиду кальцію; *група 2* – за сучасним способом виготовлення пергаменту для реставраційних потреб з використанням двостадійного вапняного зоління при більшій витраті гідроксиду кальцію; *група 3* – за стародавнім способом виготовлення пергаменту-транспаранту шляхом сульфідно-вапняного зоління; *група 4* – шляхом прискореного окиснювального зоління [6].

Оскільки вода має надзвичайно важливе значення для структури та властивості колагену – основної складової пергаменту – як стабілізатор та пластифікатор, цікаво було дослідити поведінку пергаменту в присутності води. Відношення пергаменту до дії води визначали шляхом витримання у ній зразків протягом 24 год та розрахунку ступеня набухання за формулою:

$$C_{вод} = \frac{M_{вод}}{M_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $C_{вод}$  – ступінь набухання у воді щодо вихідної маси зразка, %;

$M_{вод}$  – маса обводненого зразка, г;

$M_0$  – маса вихідного зразка, г.

З рис. 1 видно, що у разі використання двостадійного вапняного зоління при більшій витраті вапна (*група 2*) ступінь набухання найвищий (223,2 %), а при сульфідно-вапняному золінні (*група 3*), навпаки, найнижчий (170,3 %).

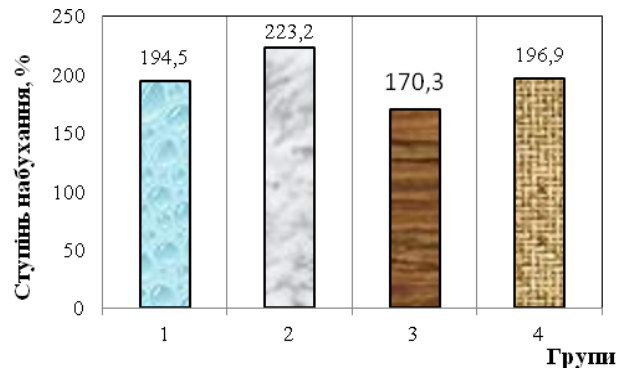


Рис. 1. Ступінь набухання пергаменту у воді

Оскільки колаген є амфотерним електролітом, він здатен реагувати як з кислотами, так із лугами. Відмінністю набухання колагену у воді від набухання в електролітах є те, що при першому пучки колагенових волокон стають більш товстими при майже незмінній довжині, а при дії кислот чи лугів відбувається ще більше потовщення та значне скорочення пучків. За спорідненістю до колагену електроліти, залежно від сорбційної активності, розташовують у такій послідовності: а) кислоти: сірчана > соляна > мурашина > молочна > оцтова; б) луги: гідроксид кальцію > гідроксид барію > гідроксид калію > гідроксид натрію > сульфід натрію > сульфат амонію; в) солі: катіони  $Ca^{2+} > Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$ ; аніони роданати > йодиди > нітрати > броміди > хлориди > ацетати > сульфати > тартрати > цитрати [8, 9].

Для встановлення стійкості колагену пергаменту до електролітів застосували відомий метод [10], який полягає у тому що обводнені протягом 24 год зразки вміщують у розчин електроліту на 0,5–3,0 год при температурі 20°C. Через кожні півгодини зразки промочують фільтрувальним папером та зважують на технічних вагах. Ступінь набухання визначають за формулою:

$$C_{ел} = \frac{M_{обр}}{M_{обв}} \cdot 100, \quad (2)$$

де  $C_{ел}$  – ступінь набухання колагену у розчині певного електроліт щодо маси обводненого зразка, %;

$M_{обр}$  – маса обводненого зразка після обробки електролітом, г;

$M_{обв}$  – маса обводненого зразка, г.

У якості електролітів використали хлоридну та сульфатну кислоти, гідроксид калію, хлорид натрію та сульфат амонію у вигляді 0,2 і 2,0 н розчинів.

Експериментально виявлено (табл. 1), що після тригодинної обробки електролітами максимальне набухання зразків пергаменту всіх чотирьох груп досягається при дії 2,0 н розчину гідроксиду калію (254,4–345,9%), особливо у *групі 2* (345,9%) (рис. 2). При зменшенні концентрації розчину цього електроліту до 0,2 н ступінь набухання пергаменту зменшується в 1,12–1,46 рази, проте, залишається доволі високим (209,7–254,9 %) у *групах 2-4*. Зі збільшенням тривалості обробки з 0,5 до 3,0 год інтенсивність дії електроліту зростає. Це пояснюється тим, що луги інтенсивніше, ніж кислоти, беруть участь у гідратації колагену, при цьому ослаблюються та руйнуються деякі водневі зв'язки, частково розриваються мембрани навколо вторинних волокон колагену в результаті їх потовщення [11, 12].

При дії 0,2 н розчину хлоридної кислоти ступінь набухання пергаменту найбільший у *групі 2* (232,5 %), найменший – у *групі 3* (170,8 %). При дії сульфатної кислоти, незалежно від її концентрації, найбільший ступінь набухання спостерігається у *групі 2* – 135,5 та 209,5 % для 2,0 та 0,2 н розчинів, а от у *групі 1* має місце зневоднення досліджуваних зразків, що можна пояснити більшою витратою гідроксиду кальцію під час виготовлення пергаменту за способом двостадійного зоління. З підвищенням концентрації та зменшенням коефіцієнту активності мінеральних кислот набухання колагену зменшується. Так, наприклад, у 2,0 н розчині сульфатної та хлоридної кислот колаген набухає менше, ніж у чистій воді.

**Набухання пергаменту у розчинах електролітів**

Група	Ступінь набухання, %				Група	Ступінь набухання, %			
	0,5 год	1,0 год	2,0 год	3,0 год		0,5 год	1,0 год	2,0 год	3,0 год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>2 н HCl</b>					<b>0,2 н HCl</b>				
1	93,0	92,0	94,8	96,2	1	141,9	153,1	163,4	179,5
2	92,9	94,8	93,3	95,1	2	179,2	209,1	216,4	232,5
3	102,2	103,4	104,5	104,5	3	154,5	167,8	166,5	170,8
4	96,0	96,9	97,5	103,1	4	154,0	169,2	184,0	189,6
<b>2 н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>					<b>0,2 н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>				
1	88,4	88,4	90,2	90,5	1	139,4	144,6	152,4	152,4
2	117,1	123,9	135,5	135,5	2	139,5	173,6	202,1	209,5
3	117,6	119,9	124,1	125,7	3	133,4	148,5	148,2	149,4
4	119,0	119,0	128,1	128,1	4	142,2	156,1	171,7	175,1
<b>2 н KOH</b>					<b>0,2 н KOH</b>				
1	172,6	197,0	247,9	275,3	1	151,4	161,1	180,1	189,9
2	225,5	276,8	300,8	345,9	2	196,3	215,3	224,1	245,3
3	184,7	203,6	241,8	254,4	3	166,0	187,7	192,0	209,7
4	206,8	240,0	269,8	286,3	4	177,2	200,0	227,2	254,9
<b>2 н NaCl</b>					<b>0,2 н NaCl</b>				
1	104,4	107,1	113,6	117,6	1	103,2	104,5	104,5	107,9
2	109,8	115,3	124,6	132,9	2	109,0	113,9	124,1	133,0
3	107,1	112,9	120,4	125,3	3	107,4	111,8	110,3	113,5
4	107,3	119,9	133,7	196,9	4	107,8	107,8	115,1	115,1
<b>2 н (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>					<b>0,2 н (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>				
1	85,8	87,8	88,9	89,9	1	100,7	103,5	107,8	107,8
2	92,15	92,9	93,6	95,5	2	106,3	108,4	119,6	125,0
3	93,7	95,7	97,3	99,2	3	102,5	105,7	111,0	111,5
4	93,4	95,2	99,4	102,3	4	108,3	113,6	114,7	115,5

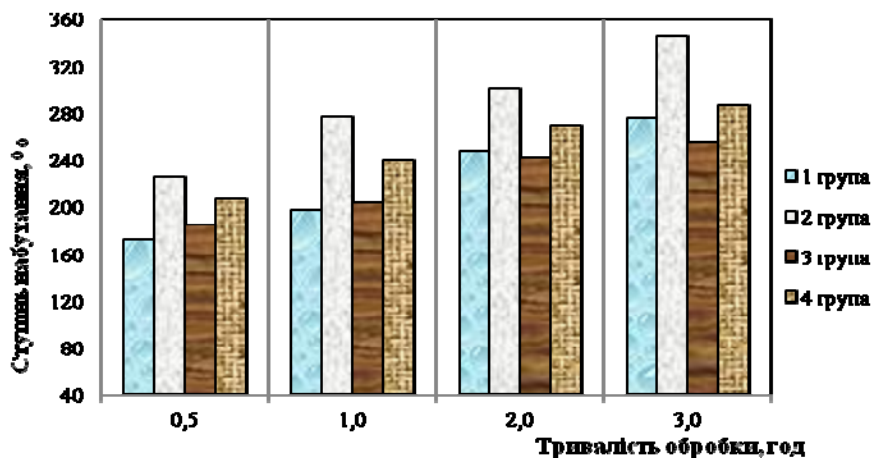


Рис. 2. Набухання пергаменту у 2,0 н розчині KOH

В ході взаємодії досліджуваних зразків з хлоридом натрію властивості колагену суттєво не змінилися. Солі проникають по місцях розташування бічних ланцюгів, довжина колагенових волокон при цьому не змінюється, змінюється їх товщина, тому при низьких і високих концентраціях відбувається незначне набухання. У разі 2 н концентрації розчину хлориду натрію найбільше набухання виявлено у групі 4 (196,9%), найменше – у групі 1 (117,6%). Для 0,2 н розчину найбільший показник спостерігається у групі 2 (133,0%), найменший – у групі 1 (107,9%).

Сульфат амонію належить до тієї групи солей, які містять іон з незначною адсорбуючою здатністю, тому після обробки цим реагентом ступінь набухання зразків незначний. Для 2,0 н розчину сульфату амонію виявилась у найбільшому набуханні групи 4 (102,3%), а 0,2 н розчину – у групі 2 (125,0%), найменше набухання встановлено у групі 1 для двох концентрацій (89,9% та 107,8% відповідно).

**Висновки**

В результаті дослідження впливу води та електролітів на властивості шкіряного пергаменту

експериментально встановлено, що під час дії електролітів максимальне набування досліджуваних зразків усіх чотирьох груп досягається у 2,0 н і 0,2 н розчині гідроксиду калію (*групи 2 і 4*), мінімальне – 2,0 н розчині сульфату амонію (*групи 1 і 3*). Показник набування зразків у воді досягає найвищого значення у *групі 2*, найменшого – у *групі 3*. Порівнявши отримані дані, можна зробити висновок, що пергамент-транспарант (*група 3*) та пергамент для письма (*група 1*) є найкращими, адже порівняно зі зразками інших двох груп вони є більш стійкими до дії води та електролітів.

### Література

1. Ryder M. L. The Biology and History of Parchment, in: Pergament: Geschichte – Struktur – Restaurierung – Herstellung // Historische Hilfswissenschaften : [ed.by P. Rück]. – J. Thorbecke Verlag. Sigmaringen. – 1991. – P. 25–34.
2. Дзєндзелюк Л.С. Пергамент: виготовлення, властивості, реставрація / [під ред. Л.В. Сніцарчук]. – Львів : НАН України, ЛННБ України ім. В. Стефаника, 2015. – 78 с.
3. Bruno Fabbri. Science and Conservation for Museum Collection. – Nardini Editore, 2017. – 472 p.
4. Галабурда А. Пергамент: проблеми збереження та реставрації / А. Галабурда // Вісник Львів. ун-ту. Серія книгозн. бібліот. та інф. технол. – 2014. – № 9. – С. 53–58.
5. Chahine C. Changes in hydrothermal stability of leather and parchment with deterioration: a DSC study / C. Chahine // Thermochemica Acta.– 2000.– Vol. 365 (1-2). – P. 101–110.
6. Адакіна Н. І. Технологічні особливості різних способів виготовлення шкіряного пергаменту / Н. І. Адакіна, Т. О. Колесник, О. А. Андреева // Вісник ХНУ. – 2018. – № 1(257). – С. 187–192.
7. Kolesnyk T.O. Investigation of the perspiration resistance and accelerated-ageing of parchment / T.O. Kolesnyk, O.A. Andreyeva, A.V. Nikonova, O.M. Savchuk // Baltic Polymer Symposium 2018: programmer and proceedings (Jurmala, September 12–14, 2018). – Latvia, 2018. – P. 79.
8. Михайлов А. Н. Физика и химия коллагена кожного покрова / А. Н. Михайлов. – М. : Легкая индустрия, 1980. – 232 с.
9. Андреева О. А. Физика та хімія протеїнів : [підруч.] / О. А. Андреева. – К. : КНУТД, 2003. – 224 с.
10. Аверьянов Н.Н. Лабораторный практикум по химии кожи, меха и дубильных экстрактов : [уч. пособие] / Н. Н. Аверьянов. – К. : ЛТИ, 1957. – 180 с.
11. Михайлов А. Н. Коллаген кожного покрова и основы его переработки / А. Н. Михайлов. – М. : Легкая индустрия, 1971. – 528 с.
12. Badea. E. Advanced physical-chemical investigations of damage at various structural levels of collagen in parchments / E. Badea, M. Saczuk, G. Della Gatta // Ann. Univ. Craiova, Chem. Ser. – 2009. – Vol. XXXVIII, No 2. – P. 49–58.

### References

1. Ryder M. L. The Biology and History of Parchment in: Pergament: Geschichte – Struktur – Restaurierung – Herstellung // Historische Hilfswissenschaften : [ed. by P. Rück]. – J. Thorbecke Verlag. Sigmaringen. – 1991. – P. 25–34.
2. Dzdzelyuk L. S. Parchment: Fabrication, Properties, Restoration / L. S. Dzdzelyuk. – Lviv: NAS of Ukraine, 2015. – 78 p.
3. Bruno Fabbri. Science and Conservation for Museum Collection. – Nardini Editore, 2017. – 472 p.
4. A. Halaburda. Parchment: problems of conservation and restoration // Visnyk Lviv. un-th Series book. bible and inf. Techno. – 2014. – No. 9. – P. 53–58.
5. Chahine C. Changes in hydrothermal stability of leather and parchment with deterioration: a DSC study / C. Chahine // Thermochemica Acta.– 2000.– Vol. 365(1-2). – P. 101–110.
6. Adakina N.I. Technological peculiarities of different ways of making leather parchment / N.I. Adakina, T.O. Kolesnyk, O. A. Andreeva // Bulletin of Khmelnytsky National University. – 2018 – No. 1 (257). – P. 187–192.
7. Kolesnyk T.O. Investigation of the perspiration resistance and accelerated-ageing of parchment / T.O. Kolesnyk, O.A. Andreyeva, A.V. Nikonova, O.M. Savchuk // Baltic Polymer Symposium 2018: programmer and proceedings (Jurmala, September 12-14, 2018). – Latvia, 2018 – P. 79.
8. Mikhailov A. N. Physics and chemistry of collagen of each cover / A. N. Mikhailov. – M.: Light industry, 1980. – 232 p.
9. Andreeva O. A. Physics and chemistry of proteins: [sub]. / O. A. Andreeva. – K.: KNUTD, 2003. – 224 p.
10. Averyanov N. N. Laboratory Workshop on Chemistry of Leather, Fur and Tanning Extracts: Uch. manual. / N. N. Averyanov. – K.: LTI, 1957–180 p.
11. Mikhailov A. N. Collagen of the skin and basis of its processing / A. N. Mikhailov. – M. : Light industry, 1971. – 528 p.
12. Badea. E. Advanced physical-chemical investigations of damage at various structural levels of collagen in parchments / E. Badea, M. Saczuk, G. Della Gatta // Ann. Univ. Craiova, Chem. Ser. – 2009. – Vol. XXXVIII, No 2. – P. 49–58.

Рецензія/Peer review : 5.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.

Рецензент: д. біол. н., проф. Савчук О. М.

Е.С. ПОСКАННАЯ, В.Н. САКЕВИЧ

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

## СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИСКУССТВЕННОГО МЕХА ПРИ ЗАМАСЛИВАНИИ ЕГО ВОЛОКОН ЭМУЛЬСОЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Работа посвящена сравнению показателей качества искусственного меха при замасливании его волокон в промышленных условиях эмульсолами различных марок (Дурон АС, Мегатекс М, Турбингал S MF, в том числе и эмульсолом ИС-2, разработанным в УО «ВГТУ» на кафедре физики и технической механики) на образцах искусственного трикотажного меха Жлобинского ОАО "Белфа", Республика Беларусь. В результате проведенных исследований получены показатели качества, на которые влияет замасливание волокон, а именно: поверхностная плотность ворсового покрова или густота ворса, поверхностная плотность трикотажного полотна, масса слабо закрепленных волокон, удельное поверхностное электрическое сопротивление, устойчивости к сваливанию ворса. Проведено сравнение результатов измерений с нормативными значениями показателей качества, регламентированных ГОСТ 28367-94 «Мех искусственный трикотажный. Общие технические условия». Разработанный в УО «ВГТУ» на кафедре физики и технической механики безжировой эмульсол ИС-2 для замасливания волокон при производстве искусственного меха по всем показателям удовлетворяет нормативным показателям качества меха, конкурентоспособен в сравнении с другими марками эмульсолов и может быть рекомендован к применению при производстве искусственного меха.

Ключевые слова: замасливание волокон, искусственный мех, густота ворса, масса слабо закрепленных волокон, удельное поверхностное электрическое сопротивление, устойчивость к сваливанию ворса.

EKATERINA SERGEEVNA POSKANNAJA, VALERIJ NIKOLAEVICH SAKEVICH  
Vitebsk State Technological University, Belarus Republic

## COMPARISON OF INDICATORS OF QUALITY ARTIFICIAL FUR DURING LUBRICATING ITS FIBERS WITH EMULSIFIERS OF VARIOUS GRADES

Work is devoted to comparison of indicators of quality artificial fur during lubricating its fibers with emulsifiers of various grades in industrial tests on samples of artificial knitted fur of Zhlobinsky JSC «Belfa». The aim of this work comparison of indicators of quality artificial fur during lubricating its fibers with emulsifiers of various grades (Duron AS, Megateks M, Turbingal S MF), including emulsion IS-2, developed in EI "VSTU" at the Department of physics and technical mechanics. As a result of the conducted researches are received quality indicators on which impact exerts oiling of fibers namely: surface density of pile cover, surface density of jersey fabric, the mass of weakly-fixed fibers, surface resistivity, pile's resistance to fulling. Measurement results were compared with normative values of the indicators of quality, regulated GOST 28367-94 «Artificial knitted fur. General specifications». Designed in "VSTU"- at the department of physics and technical mechanics fat-free emulsol for sizing fibers in the manufacture of artificial fur in all indicators meet the regulatory indicators fur quality and fat-free emulsol can be recommended for use in the manufacture of artificial fur.

Keywords: application of oil, artificial fur, density of pile, the mass of weakly-fixed fibers, surface resistivity, pile's resistance to fulling

### Постановка проблемы и методы исследований

Проблема обеспечения отечественной текстильной промышленности современными качественными поверхностно-активными и текстильно-вспомогательными веществами (ПАВ и ТВВ) всегда была актуальна [1]. Особенно она приобретает актуальность сегодня в условиях более жестких требований рынка к качеству конечной продукции. При отсутствии в Республике Беларусь собственных производителей поверхностно-активных и текстильно-вспомогательных веществ, текстильной промышленности приходится применять импортные продукты, которые поставляются по достаточно высокой цене. Также постоянно увеличиваются требования и к химическим препаратам, обеспечивающим современный уровень процессов переработки.

Несмотря на огромное число статей (особенно патентов), посвященных важным, замасливающим, антистатическим обработкам, и большое количество предлагаемых препаратов, теория процессов регулирования трения, мягкости и антистатических свойств волокон почти не разработана. Это объясняется не только сложностью самих процессов, но и тем, что свойства поверхности волокон могут сильно изменяться под влиянием множества факторов. Например, коэффициент трения и величина электростатических зарядов различны в зависимости от количества веществ, наносимых на поверхность волокна, температуры и продолжительности обработки, натяжения нитей, способа нанесения препаратов и т. п. Из-за отсутствия теоретических предпосылок, разнообразия применяемых препаратов и условий обработки, а также из-за множества требований к свойствам готовых волокон со стороны потребителей, практическое решение многих проблем, связанных с отделкой химических волокон, сопряжено с большими трудностями [2].

В свете выше изложенного в Витебском государственном технологическом университете (УО «ВГТУ») на кафедре физики и технической механики включились в решение этих проблем, и был разработан безжировой замасливатель [3] широкого технологического назначения.

При производстве искусственного меха замасливание волокон осуществляется с целью повышения их цепкости друг к другу, гибкости и эластичности, уменьшения электризации и пыления волокон.



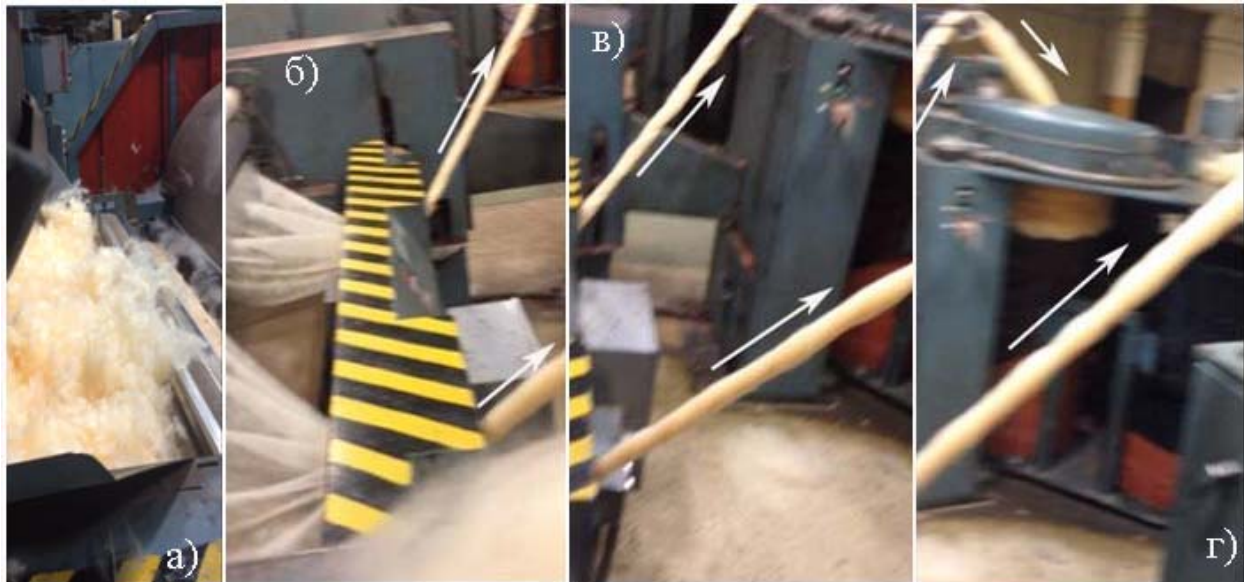


Рис. 1. Получение чесальной ленты: а) загрузка замасленных волокон; б) получение чесальной ленты из прочеса; в) и г) движение чесальной ленты к уплотнительной воронке

На рис.1 показан процесс получения чесальной ленты. На пути движения чесальной ленты к уплотнительной воронке, как показано на рис.1 стрелками, важна её прочность, чтобы не было обрывов. Эта прочность при прочих равных условиях создается как извитостью волокон, так и их замасливанием, что повышает цепкость волокон друг к другу и увеличивает прочность ленты на разрыв.

На ОАО "Белфа" скопилось на складе много волокна, которое они не могли переработать с использованием уже известных замасливателей. Чесальная лента разрушается при движении к уплотнительной воронке под действием собственного веса по причине низкой цепкости волокон.

Цель данной работы – сравнение показателей качества искусственного меха при замасливании его волокон различными эмульсолами, которые уже используются в производстве (Дурон АС, Мегатекс М, Турбингал S MF) и эмульсомом ИС-2, разработанным в УО «ВГТУ» на кафедре физики и технической механики авторами данной статьи [3–6], а также при их сочетании в различных комбинациях и концентрациях.

Трикотажный искусственный мех – трикотажное полотно, имеющее на лицевой поверхности ворс, имитирующий натуральный мех [7].

Мех на трикотажной основе получают на кругловязальных трикотажных машинах способом вязывания в петли грунта пучков волокон из чесаной ленты, либо способом вязания грунта с одновременным формированием плюшевых петель. В зависимости от технологии производства искусственного меха определенного назначения лента может прочесываться 2 раза (1-прочес, 2-прочес).

Доводочные испытания, имитирующие реальные условия эксплуатации эмульсола ИС-2 проводились на промышленном оборудовании ОАО "Белфа" и по их технологиям изготовления искусственного трикотажного меха различного назначения. Были выбраны следующие образцы искусственного трикотажного меха:

- ◆ И-32 (состав – канекарон) – искусственный мех для верхней одежды, гладкоокрашенный;
- ◆ И-59 (состав – ПАН+П/Э) – искусственный мех для игрушек, коротковорсовый;
- ◆ И-81-1ВУ9Д19 (состав – ПАН 100%) – искусственный мех для игрушек, коротковорсовый, с эффектом ворсоукладки.

Необходимые показатели физико-механических и физико-химических свойств искусственного меха для контроля его качества, а также методика отбора проб регламентированы ГОСТ 26666.0 – 85 [8]. Показатели качества трикотажного искусственного меха определены ГОСТ 4.80-82 [9]. В соответствии с ГОСТ 4.80-82 [9] показатели качества меха подразделяют на общие показатели, обязательные для всех классификационных группировок, и специализированные показатели, применяемые только для некоторых группировок (обязательные и необязательные). К общим обязательным показателям качества относят: состав смеси ворса; вид и линейную плотность пряжи грунта; поверхностную плотность; массу ворсового покрова или густоту ворса; массу слабо закрепленных волокон; устойчивость окраски; длину ворса; число петельных рядов и петельных столбиков на 10 см.

Приведем результаты исследований показателей качества, на которые может повлиять замасливание волокон, а именно: поверхностная плотность ворсового покрова, масса слабо закрепленных волокон, удельное поверхностное электрическое сопротивление, устойчивости к сваливанию ворса. Измерения показателей качества проводились в лаборатории ОАО "Белфа" на поверенном оборудовании по методикам, регламентируемым ГОСТами и разработанным в лаборатории ОАО "Белфа".

Значения нормативных показателей качества зависят от предназначения искусственного меха, и регламентируется согласно ГОСТ 28367-94 [10].

Метод определения поверхностной плотности ворсового покрова регламентирован ГОСТ 3815.1-93 [11].

### Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний по определению поверхностной плотности ворсового покрова сведены в таблицу 1.

Таблица 1

#### Поверхностная плотность ворсового покрова

Вид меха	№ образца	Состав эмульсии	Масса ворсового покрова, г/м <sup>2</sup>	
			Норма (не менее)	Факт
Н-32 искусственный мех для верхней одежды, гладкоокрашенный	1	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	290	314
		2- прочес: Мегатекс М		
	2	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	290	312
		2- прочес: ИС-2 (2 г/кг)		
	3	1- прочес: Дурон АС	290	336
2- прочес: Мегатекс М				
4	1- прочес: ИС-2 (2,8 г/кг)	290	348	
	2- прочес: Мегатекс М			
5	1- прочес: Дурон АС	290	308	
	2- прочес: Мегатекс М			
И-59 искусственный мех для игрушек, коротковорсовый	6	ИС-2 (2 г/кг)	130	137
	7	ИС-2 (4 г/кг)	130	133
	8	Дурон АС + Турбингал S MF	130	138
И-81-1ВУ9Д19 искусственный мех для игрушек, коротковорсовый, с эффектом ворсоукладки	9	ИС-2 (3 г/кг)	200	238
	10	Дурон АС + Турбингал S MF	200	236

Анализируя показатель поверхностной плотности ворсового покрова, следует ориентироваться на указанную норму данного показателя в ГОСТ 28367-94 [10]. Фактический результат должен быть равен или больше указанной нормы.

Результаты проведенных исследований показывают, что применение замасливания волокон безжировым эмульсолом ИС-2 при производстве искусственного меха ведет к увеличению массы ворсового покрова, и фактический показатель поверхностной плотности ворсового покрова больше нормы. Конкретное значение показателя поверхностной плотности ворсового покрова зависит от марки эмульсола и ее концентрации. В случае гладкоокрашенного меха для верхней одежды (Н-32) наиболее предпочтительным является применение комбинации препаратов ИС-2 с концентрацией эмульсии 2,8 г/кг и «Мегатекс М» (образец №3). Применение такой же комбинации, но с меньшей концентрацией ИС-2 (2 г/кг), дает также положительный эффект, но несколько меньший, чем предыдущий вариант (образец №1). Применение комбинации эмульсий ИС-2/ ИС-2 (концентрация эмульсии 2 г/кг, на обоих переходах, образец № 2) дает меньший положительный эффект, чем в случае с образцами №1 и №3. Для игрушечного меха И-59 значение поверхностной плотности ворсового покрова зависит от концентрации эмульсии (образцы №4 и №5). При выработке игрушечного меха с эффектом ворсоукладки И-81-1ВУ9Д19 применение безжирового эмульсола ИС-2 приводит к повышению поверхностной плотности ворсового покрова.

Качество произведенного искусственного меха, также характеризуется посредством определения значений эксплуатационных показателей. Данные показатели определяют характер износа материалов при эксплуатации изделий. К ним относят: масса слабо закрепленных волокон и устойчивость к сваливанию.

Определение массы слабо закрепленных волокон в ворсе искусственного трикотажного меха регламентируется ГОСТ 26666.3-85 [8].

Результаты испытаний по определению массы слабо закрепленных волокон в ворсе выбранных образцов сведены в таблицу 2.

Анализируя показатель массы слабо закрепленных волокон, требуется ориентироваться на указанную норму данного показателя в ГОСТ 28367-94 [10]. Фактический результат не должен ее превышать.

Следует отметить концентрации эмульсий дающих минимальные значения показателя массы слабо закрепленных волокон. Для образца вида меха Н-32 – эмульсия ИС-2 при концентрации эмульсии 2 г/кг на обоих переходах, образец № 2; для образца И-81-1ВУ9Д19 – применение ИС-2 с концентрацией эмульсии 3 г/кг, образец №6.

Определение устойчивости меха к сваливанию ворса регламентируется ГОСТ 21516-76 [13]. Согласно ГОСТ 21516-76 по внешнему виду элементарные пробы сравнивают с фотоэталоном и оценивают в зависимости от степени сваливания в баллах:



Таблица 2

**Масса слабо закрепленных волокон**

Вид меха	№ образца	Состав эмульсии	Масса слабо закрепленных волокон, г/м <sup>2</sup>	
			Норма	Факт
Н-32	1	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	8	1,6
		2- прочес: Мегатекс М		
	2	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	8	1,5
		2- прочес: ИС-2 (2 г/кг)		
	3	1- прочес: Дурон АС	8	1,5
		2- прочес: Мегатекс М		
	4	1- прочес: ИС-2 (2,8 г/кг)	8	1,9
		2- прочес: Мегатекс М		
	5	1- прочес: Дурон АС	8	1,9
		2- прочес: Мегатекс М		
И-59	6	ИС-2 (2 г/кг)	4,5	1,0
	7	ИС-2 (4 г/кг)	4,5	1,03
	8	Дурон АС + Турбингал S MF	4,5	1,04
И-81-1ВУ9Д19	9	ИС-2 (3 г/кг)	8,0	1,5
	10	Дурон АС + Турбингал S MF	8,0	1,7

Таблица 3

**Устойчивость к сваливанию ворса**

Вид меха	№ образца	Состав эмульсии	Устойчивость к сваливанию, балл
Н-32	1	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	2
		2- прочес: Мегатекс М	
	2	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	2
		2- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	
	3	1- прочес: Дурон АС	2
		2- прочес: Мегатекс М	
	4	1- прочес: ИС-2 (2,8 г/кг)	-
		2- прочес: Мегатекс М	
	5	1- прочес: Дурон АС	-
		2- прочес: Мегатекс М	
2- прочес: Мегатекс М			

- 1 – очень сваливающиеся;  
 2 – сильно сваливающиеся;  
 3 – средне сваливающиеся;  
 4 – слабо сваливающиеся;  
 5 – несваливающиеся.

Результаты испытаний по определению устойчивости к сваливанию ворса выбранных образцов сведены в таблицу 3.

Как показали результаты исследований состав и концентрация эмульсии не влияют на устойчивость ворса к сваливанию. Величина данного показателя находится в пределах нормы, т.к. согласно ГОСТ 28367-94 [10] устойчивость к сваливанию меха всех видов (кроме меха под «овчину») должна быть не менее 2 баллов. При определении качества выработанного меха применяются гигиенические показатели. Для искусственного меха таким показателем является показатель удельного поверхностного электрического сопротивления, который регламентируется ГОСТ 29104.20-91 [14]. Данный показатель характеризует способность искусственного меха рассеивать электрические заряды.

Сущность метода по определению показателя удельного поверхностного электрического сопротивления заключается в определении электрического сопротивления элементарной пробы искусственного меха, находящейся между двумя электродами, к которым подается напряжение.

Результаты испытаний по определению удельного поверхностного электрического сопротивления выбранных образцов искусственного меха сведены в таблицу 4.

Значение нормативного показателя удельного поверхностного электрического сопротивления искусственного меха регламентируется ГОСТ 28367-94 [10]. Фактический результат не должен ее превышать. Следует отметить, что величина показателя удельного поверхностного электрического сопротивления искусственного меха зависит от марки эмульсии и от ее концентрации. В случае гладкоокрашенного меха для верхней одежды Н-32 наиболее близким к верхнему пределу является результат применения комбинации препаратов ИС-2 с концентрацией эмульсии 2 г/кг и «Мегатекс М»

(образец № 1).

Таблица 4

**Удельное поверхностное электрическое сопротивление искусственного меха**

Вид меха	№ образца	Состав эмульсии	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	
			Норма (не более)	Факт
И-32	1	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	5·10 <sup>10</sup>
		2- прочес: Мегатекс М		
	2	1- прочес: ИС-2 (2 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	2,73·10 <sup>10</sup>
		2- прочес: ИС-2 (2 г/кг)		
	3	1- прочес: Дурон АС	5·10 <sup>10</sup>	2,21·10 <sup>10</sup>
		2- прочес: Мегатекс М		
	4	1- прочес: ИС-2 (2,8 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	-
		2- прочес: Мегатекс М		
	5	1- прочес: Дурон АС	5·10 <sup>10</sup>	-
		2- прочес: Мегатекс М		
И-59	6	ИС-2 (2 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	3,77·10 <sup>10</sup>
	7	ИС-2 (4 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	3,87·10 <sup>10</sup>
	8	Дурон АС + Турбингал S MF	5·10 <sup>10</sup>	2,87·10 <sup>10</sup>
И-81-1ВУ9Д19	9	ИС-2 (3 г/кг)	5·10 <sup>10</sup>	-
	10	Дурон АС + Турбингал S MF	5·10 <sup>10</sup>	-

Таблица 5

**Прочность чесальной ленты**

Вид меха	№ образца	Состав эмульсии	Средняя прочность чесальной ленты, Н	Коэффициент вариации С, %	Средняя линейная плотность чесальной ленты, ктекс
И-59	1	ИС-2 (2 г/кг)	1,14	9,5	13,8
	2	ИС-2 (4 г/кг)	1,20	4,7	15,1
	3	Дурон АС + Турбингал S MF	1,12	10,7	13,5

Применение комбинации эмульсий ИС-2/ ИС-2 (концентрация эмульсии 2 г/кг, на обоих переходах, образец № 2) приводит к лучшему результату, чем в случае с образцом №1.

Проведены исследования прочности чесальной ленты для И-59 – искусственного меха для игрушек, коротковорсового, как наиболее часто разрушающегося при движении к уплотнительной воронке под действием собственного веса в результате низкой сцепляемости волокон. Результаты испытаний на прочность чесальной ленты при применении различных эмульсий представлены в таблице 5.

Обратим внимание, что наилучший результат (образец № 2) получен с применением эмульсии ИС-2 (концентрация эмульсии 4 г/кг) - наибольшая прочность и минимальный коэффициент вариации, т.е. наилучшая равномерность прочности вдоль ленты.

Отметим, что все исследования проводились на одной и той же технологической линии при одинаковых параметрах работы машин, чтобы исключить влияние других факторов на прочность чесальной ленты и проводить сравнения только влияния замасливателя на параметры ленты.

В итоге, следует отметить, что за счет уменьшения выхода отходов волокон прочность чесальной ленты при применении эмульсола ИС-2 превосходит более чем на 7%, а коэффициент вариации более чем на 9% такие же параметры эмульсолов конкурентов Дурон АС и Турбингал S MF.

Следует также отметить, что эмульсол ИС-2 является замасливателем широкого технологического назначения, так как показали доводочные испытания, имитирующие реальные условия его эксплуатации, эмульсол ИС-2 можно одинаково эффективно применять для таких синтетических волокон как пан, п/э и канекарон. В настоящее время при работе с этими синтетическими волокнами используют три марки замасливателя.

**Выводы**

Разработанный в УО «ВГТУ» на кафедре физики и технической механики безжировой эмульсол ИС-2 для замасливания волокон при производстве искусственного меха прошел доводочные испытания, имитирующие реальные условия его эксплуатации. По всем показателям качества, регламентированным ГОСТ 28367-94 [10] эмульсол ИС-2 удовлетворяет нормативным показателям и, следовательно, может быть рекомендован к применению при производстве искусственного меха.

## Література

1. Степанова Т. Ю. Эмульсирование как способ модификации свойств поверхности текстильных волокон: монография / Т. Ю. Степанова // Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2011. – 118 с.
2. Назарова М. В. Теория процессов подготовки нитей к ткачеству. Часть II: учебное пособие / М.В. Назарова, В.Ю. Романов // Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2006. – 68 с.
3. Замасливатель ИС-2 : ТУ ВУ 100006975.024-2016 / разр. А. П. Толкач, В. Н. Сакевич, Е. С. Посканная. – [Введ. с 21.03.2017]. – 13 с.
4. Дребенкова И.В. Некоторые особенности изменения свойств олеиновой кислоты после ультразвуковой обработки / И.В. Дребенкова, Е.С. Максимович, В. Н. Сакевич, И.П. Фалюшина, Т.Я. Царюк, Ю.А. Шиенок // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2010. – Вып. 19. – С. 111–117.
5. Посканная, Е.С. Влияние замасливания волокон безжировым эмульсолом на показатели качества искусственного меха / Е.С. Посканная, В. Н. Сакевич // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – № 1(30). – С. 99–104.
6. Максимович Е.С. Разработка и исследование замасливающих композиций модифицированных кавитационным воздействием / Е.С. Максимович, В.Н. Сакевич // Вестник Киевского национального университета технологий и дизайна. – 2013. – № 3. – С. 290–299.
7. Мех искусственный трикотажный. Термины и определения : ГОСТ 25562-82. – [Введ. 29.12.1982]. – 12 с.
8. Мех искусственный трикотажный. Правила приемки и метод отбора проб : ГОСТ 26666.0-85. – [Введ. 01.01.1987]. – 13 с.
9. Система показателей качества продукции. Мех искусственный трикотажный. Номенклатура показателей : ГОСТ 4.80-82. – [Введ. 01.01.1984]. – 7 с.
10. Мех искусственный трикотажный. Общие технические условия : ГОСТ 28367-94. – [Введ. 01.09.2004]. – 15 с.
11. Материалы ворсовые. Метод определения поверхностной плотности ворсового покрова : ГОСТ 3815.1-93. – [Введ. 01.01.1995]. – 7 с.
12. Мех искусственный трикотажный. Метод определения массы слабозакрепленных волокон : ГОСТ 26666.3-85. – [Введ. 01.01.1987]. – 10 с.
13. Мех искусственный из химических волокон. Метод моделирования износа и оценки износоустойчивости : ГОСТ 21516-76. – [Введ. 01.01.1978]. – 8 с.
14. Ткани технические. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления : ГОСТ 29104.20-91. – [Введ. 01.01.1993]. – 6 с.

## References

1. Stepanova, T. Ju. (2011), Emulsifying as a way to modify the properties of the surface of textile fibers, Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 118 p.
2. Nazarova, M. V., Romanov V. Ju., (2006), Theory of the processes of preparation of yarns for weaving, Part II: tutorial. Volgograd, Volgograd State Technical University, 68 p.
3. TR BY 100006975.024-2016. Emulsion IS-2 / Devel. A. P. Tolkach, V. N. Sakevich, E. S. Poskannaja. Enacted 21.03.2017. – 13 p.
4. Drebenkova, I.V., Maksimovich, E.S., Sakevich, V. N., Faljushina, I.P., Carjuk, T.Ja., Shienok Ju.A. (2010), Some features of changes in the properties of oleic acid after ultrasonic treatment, *Bulletin of Vitebsk state technological University*, 2011, №19, pp. 111-117.
5. Poskannaja, E.S., Sakevich, V. N. (2016), Application of oil by fat-free emulsol and its influence on quality score of artificial fur - *Bulletin of Vitebsk state technological University*, 2016, №1(30).- pp. 99-104.
6. Maksimovich, E.S., Sakevich, V. N. (2013), Development and investigation of oling compositions modified cavitations effects, *Bulletin of the Kiev National University Technologies and Design*, , 2013, №3. – pp. 290-299.
7. GOST 25562-82. Knit pile fabric. Terms and definitions. – Enacted 29.12.1982. – 12 p.
8. GOST 26666.0-85. Knit pile fabric. Acceptance rules and sampling method. – Enacted 01.01.1987. – 13 p.
9. GOST 4.80-82. Product's quality indicator system. Knit pile fabric. Set of tested parameters. – Enacted 01.01.1984. – 7 p.
10. GOST 28367-94. Knit pile fabric. General specifications. - Enacted 01.09.2004. – 15 p.
11. GOST 3815.1-93. Pile materials. Method for determination surface density of pile cover. – Enacted 01.01.1995. – 7 p.
12. GOST 26666.3-85. Knit pile fabric. Method for determination of mass of weakly-fixed fibers. – Enacted 01.01.1987. – 10 p.
13. GOST 21516-76. Knit pile fabric from chemical fibers. Method of wear simulation and evaluation of durability. – Enacted 01.01.1978. – 8 p.
14. GOST 29104.20-91. Industrial fabrics. Method for determination of surface resistivity. – Enacted 01.01.1993. – 6 p.

Рецензія/Peer review : 27.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Рыклин Д.Б.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІГРАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З УПАКОВКИ

У роботі представлені дослідження зі встановлення рівнів міграції шкідливих речовин з паперової та металічної упаковок, які використовують для пакування харчових продуктів. Для оцінки рівнів міграції використано широкий спектр методик (фізико-хімічні методи та біотестування на *Chlorella vulgaris* Beijer, *Triticum L.*, *Avena satia L.*, *Hordeum vulgare*), що дозволяє в комплексі проаналізувати властивості обраних матеріалів. Оцінка та аналіз екологічної безпеки проводили за такими критеріями: токсична кратність розведення, порогове (*Lim R*) та ефективне розведення (*ER50*) і допустима кількість міграції.

Ключові слова: паперова, комбінована металічна упаковка, біотестування, токсична кратність розведення, порогове та ефективне розведення, допустима кількість міграції.

T.V. IVANISHENA, O.O. IVANISHENA

Khmelnitsky National University

## RESEARCH OF THE SAFETY OF POLYMERIC PACKAGING MATERIALS

The purpose of research is to studies the levels of migration of harmful substances from paper and metal packaging used for food packaging. A wide range of techniques (physicochemical methods and biotesting on *Chlorella vulgaris* Beijer, *Triticum L.*, *Avena satia L.*, *Hordeum vulgare*) was used to evaluate the migration levels, which allows the complex to analyze the properties of the selected materials. The assessment and analysis of environmental safety was carried out according to the following criteria: toxic reproduction multiplicity, threshold (*Lim R*) and effective dilution (*ER50*) and permissible amount of migration. By biotesting method it was established that the relative difference of optical density for selected paper based packaging materials is 3.70%, and for metal packaging materials it is more in the package of white tin (4.17%), which does not exceed the criteria of toxicity. With the help of the phytotesting method, it was found that for packing with Tetra Pak there is a greater phytoeffect, it is 58.23%. Among the metal packaging, the largest phytoeffect in aluminum packaging is 26.50%. According to the toxicity criterion, packing materials are classified in class 4. Physico-chemical methods have shown that the sum of the ratios of the concentration of the found substance in aqueous extracts to the values of DCM is higher in the cured foil, equal to 2.73, and with the metal packaging more in the aluminum packaging - 3.437. In addition, in metal packaging materials, the concentration of lead in an aqueous extractor from aluminum packaging and white gum exceeds the DCM.

Keywords: packaging materials, biotesting, toxic multiplicity of breeding, threshold and effective dilution, allowable amount of migration

### Постановка проблеми

Виробництво упаковок для харчової і промислової продукції в Україні останнім часом розвивається швидкими темпами. Традиційні пакувальні матеріали вдосконалюються, створюються більш сучасні та високоякісні, застосовуються наукові та технологічні досягнення з покращення їхніх властивостей, що дає можливість зменшити вагу упаковки, створити тару багаторазового використання [1]. У той самий час кожний розуміє вагомість екологічної проблеми, яка так чи інакше пов'язана з упаковкою. Безпека упаковки означає, що в ній містяться шкідливі для організму речовини, які можуть перейти в товар, безпосередньо дотичний з упаковкою. Найбільш безпечна скляна і тканинна тара, найменш – металева і полімерна. Абсолютно безпечних для навколишнього середовища видів упаковки немає, так як при утилізації різних видів упаковки в навколишнє середовище виділяються різноманітні речовини, що відрізняються різним ступенем впливу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

При виробництві продуктів харчування не можливо виключати перехід в харчовий продукт небезпечних речовин з пакувальних матеріалів. Існують норми допустимих кількостей переходу речовин в продукти.

Залежно від способу міграції, пакувальні матеріали поділяють на три класи:

1. Клас 1. Упаковка, яка не проявляє міграції. Ця ідеальна ситуація можлива для різних типів упаковки за умови, що температура і природа упакованого продукту належним чином узгоджені. Ідеальні умови нульової міграції можуть реалізуватися для твердих (сухих) продуктів (борошно, цукор, кава, сіль, сушені фрукти і овочі і т.д.), що знаходяться в контакт з інертними матеріалами (скло, жерсть, папір) в безводному середовищі. Деякі пластики, такі як нейлон і, до певної міри, поліетилен і поліефіри, епоксиди (для покриття банок) і плівки целюлози, можна включити в цей клас при їх використанні для упаковки твердих сухих продуктів, що не містять масел.

2. Клас 2. Упаковка, що створює “незалежну” міграцію, тобто ту міграцію, яка не викликається упакованим продуктом. Більшість термопластичних полімерів, що використовуються для упаковки, відносяться до цього класу. Мігрантами є легкі компоненти, найчастіше це мономери.

Міграція цих компонентів здійснюється шляхом дифузії. Молекули мігрантів дифундують до пластика і випаровуються у повітря. В силу їх можливої токсичності (наприклад, вінілхлорид, стирол) або можливих змін органолептичних властивостей упакованих продуктів ці міграції повинні бути обмежені.

3. Клас 3. Упаковка, в якій відбувається “залежна” міграція, яка викликана вмістом упаковки. Такі явища обміну мають місце у випадках більшості упакованих товарів: “залежна” міграція визначається

контактом з рідким середовищем і, меншою мірою, температурою. Міграція залежить від фізико-хімічних властивостей обох контактуючих елементів – від типу упаковки і природи упакованого продукту.

Жерсть і алюміній при контакті з кислотними або лужними водними середовищами піддаються корозії, в результаті якої іони металу переходять в розчин. Присутність іонів металу викликає зміну смаку і може привести до отруєння [2].

Міграція шкідливих речовин з упаковки обумовлюється складом матеріалів для її виготовлення та процесами обробки.

Для оцінки міграції речовин використовують показники інтегральної токсичності для визначення яких поряд з методами хімічного аналізу застосовуються методи біотестування.

Біотестування дає змогу за відповідною реакцією тест-організму отримати інтегральну інформацію за всією сукупністю впливових (токсичних) агентів, які чинять вплив на тест-об'єкт. Завдяки простоті, оперативності та доступності, біотестування отримало широке визнання у всьому світі [3].

Застосування біотестування має ряд переваг перед фізико-хімічним аналізом, засобами якого часто не вдається виявити нестійкі сполуки або кількісно визначити малі концентрації екотоксикантів. Доволі частими є випадки, коли виконаний сучасними засобами хімічний аналіз не показує наявності токсикантів, тоді як використання біологічних тест-об'єктів свідчить про їх присутність в досліджуваному середовищі. Біотестування дає можливість швидкого отримання інтегральної оцінки токсичності, що робить вельми привабливим його застосування при скринінгових дослідженнях [4]. Фітотестування рекомендовано для оцінки фітотоксичної дії хімічних речовин при обґрунтуванні їх ГДК [5].

#### Мета і завдання досліджень

Метою дослідження є встановлення рівня міграції забруднюючих речовин з упаковки, виготовленої з різної сировини. Для цього необхідно вирішити ряд завдань:

- 1) проаналізувати склад сучасних пакувальних матеріалів;
- 2) підібрати методику по визначенню кількісних показників, які характеризують рівень міграції речовин з упаковки;
- 3) провести експериментальні дослідження екстрактів пакувальних матеріалів на вміст шкідливих речовин;
- 4) визначити показники інтегральної токсичності упаковки;
- 5) порівняти сучасні пакувальні матеріали щодо безпечності для здоров'я людини за рівнем міграції з них шкідливих речовин..

#### Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень у якості об'єктів були обрані дві групи пакувальних матеріалів:

- картонно-паперова упаковка – кашована фольга (комбінований матеріал) та упаковка Tetra-Pak;
- металева упаковка – алюмінієва банка та банка з білої жерсті.

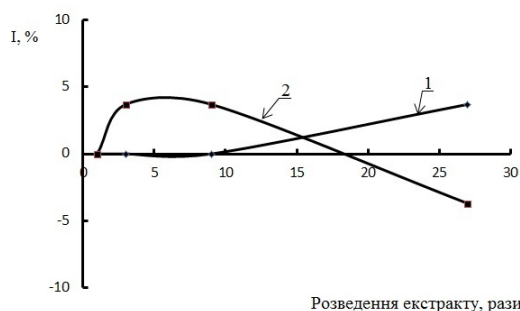
Витяжку з картонно-паперових пакувальних матеріалів готували шляхом змішування зразків упаковки розміром 10x10 мм в колбі зі шліфом, і 100 мл води та настоюванні протягом 1 год. при температурі від 20 до 25°C струшуючи через кожні 10–15 хв [6].

Для отримання витяжки з металевих пакувальних матеріалів металеву упаковку поміщали в ємність, заповнену дистильованою водою та витримували у сушильній шафі протягом 1 год при температурі 121°C, після чого залишали відстоюватися протягом 10 діб при кімнатній температурі [7].

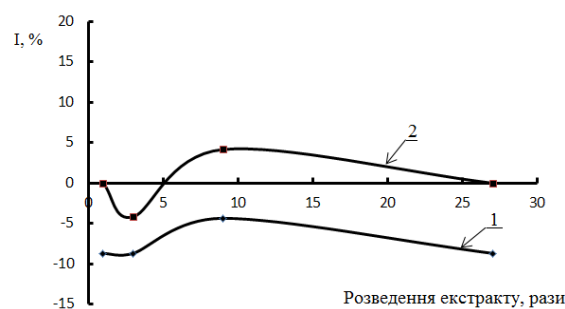
Рівень міграції визначали за показниками інтегральної токсичності, визначеними методами біотестування. У якості тест-об'єктів обрано водорості *Chlorella vulgaris* Beijer та насіння *Triticum L.*, *Avena satia L.*, *Hordeum vulgare*.

При проведенні біотестування за допомогою *Chlorella vulgaris* Beijer отриманні залежності зміни оптичної густини витяжок пакувальних матеріалів від розведення екстрактів.

В експериментах з визначення гострої токсичної дії встановлюють токсичну концентрацію окремих речовин або токсичну кратність розведення води і водних витяжок, що містять суміші речовин, що викликають зниження на 20% і більше або збільшення на 30% і більше величини оптичної густини тест-культури водорості в порівнянні з контролем за 72 години світлової експозиції.



1 – упаковка Tetra Pak; 2 – упаковка з кашованої фольги  
Рис. 1. Залежність відносної різниці величини оптичної густини I від розведення екстракту паперової упаковки



1 – алюмінієва упаковка; 2 – упаковка з білої жерсті  
Рис. 2. Залежність відносної різниці величини оптичної густини I від розведення екстракту металевих пакувальних матеріалів

Для спостереження за зміною значення відносної різниці величини оптичної густини  $I$  в залежності від розведення екстракту побудовано графіки (рисунок 1 та рисунок 2).

На рисунку видно, що упаковка з кашованої фольги проявляє невисокий стимулюючий ефект на *Chlorella vulgaris* Beijer. Такий ефект може бути викликаний наявністю мікроелементів цинку у невеликих концентраціях, які стимулюють ріст і розвиток *Chlorella vulgaris* Beijer. Ці мікроелементи знаходяться у сплаві алюмінію з якого виготовляється алюмінієва фольга для упаковки Tetra Pak та кашована фольга для упаковки масла.

На основі експериментальних даних встановили середню ефективну концентрацію токсичності речовин  $EK_{25}$ , що містяться у водних витяжках.

$$EK_{25} = 10^{2.08} = 112,21 \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}$$

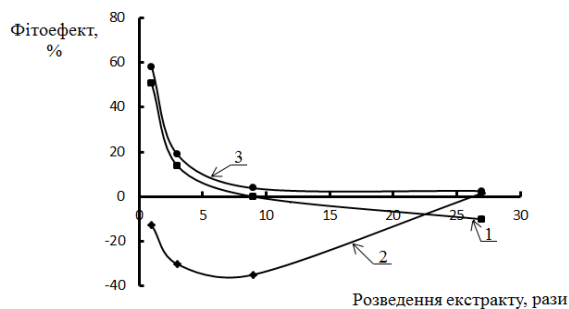
Тобто, для того, щоб викликати токсикологічний ефект у 25% *Chlorella vulgaris* Beijer, необхідно, щоб концентрація становила  $112,21 \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}$ .

Відносна різниця оптичної густини для металевих упаковок не перевищує вказані показники токсичності, тому можна припустити, що водні витяжки таких матеріалів не містять речовини, здатні викликати токсикологічний ефект у *Chlorella vulgaris* Beijer

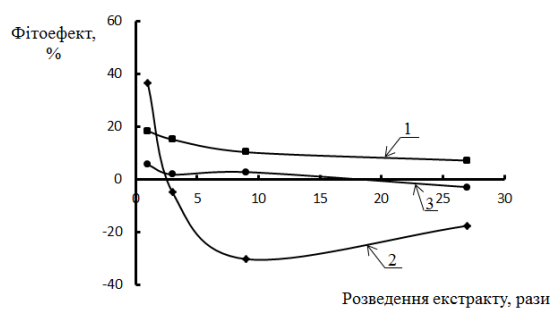
На графіку видно, що водна витяжка з алюмінієвої упаковки проявляє стимулюючий ефект на *Chlorella vulgaris* Beijer. Це пов'язано з наявністю у водній витяжці мікроелементів алюмінію та цинку, який покращують ріст і розвиток *Chlorella vulgaris* Beijer. Алюміній та цинк використовуються для алюмінієвого сплаву, з якого потім виготовляється металева упаковка. Водна витяжка з білої жерсті має спадаючий характер, спостерігається зростання, але у межах похибки.

Метод фітотестування призначений для встановлення сумарної токсичності і класу небезпеки по фітотоксичній дії (фіто ефекту), спостерігається при інгібуванні (гальмуванні) росту коренів насіння на 20% і більше в порівнянні з контролем. Фіто ефект, що виявляється у вигляді пригнічення росту, наводяться зі знаком (+), а його стимуляції – із знаком (-).

Результати фітотестування витяжок з пакувальних матеріалів на основі паперу за допомогою фіто тест-об'єктів *Triticum L.*, *Avena satia L.*, *Hordeum vulgare* наведені на рис. 3, 4.



1 – *Triticum L.*; 2 – *Avena satia L.*; 3 – *Hordeum vulgare*  
Рис. 3. Залежність фіто ефекту від розведення екстракту упаковки Tetra Pak



1 – *Triticum L.*; 2 – *Avena satia L.*; 3 – *Hordeum vulgare*  
Рис. 4. Залежність фіто ефекту від розведення екстракту упаковки з кашованої фольги

Нерозведена водна витяжка упаковки Tetra Pak проявляє інгібуючий ефект на *Triticum L.*, для інших розведень та для упаковки з кашованої фольги фітотоксична дія відсутня.

Стимулююча дія водних витяжок на довжину коренів *Avena satia L.* проявилася майже на усіх варіантах. Тільки у нерозведеній водній витяжці упаковки з кашованої фольги спостерігається фітотоксична дія.

Нерозведена витяжка упаковки Tetra Pak проявляє інгібуючий ефект на *Hordeum vulgare*., для інших розведень та упаковки з кашованої фольги інгібуючий ефект відсутній.

Можливо, фітотоксична дія на тест-об'єкти пов'язана з підвищеним вмістом важких металів у пакувальних матеріалах, які негативно впливають на життєздатність тест-рослин: проростання та довжину коренів.

З проведених досліджень встановлено, що фітотест-об'єкт *Triticum L.* є найбільш чутливий до наявності шкідливих речовин у водних витяжках незалежно від концентрацій. Найменші відсотки проростання у *Avena satia L.*, що вказує на те, що тест-об'єкт менш чутливий до шкідливих речовин у водних витяжках.

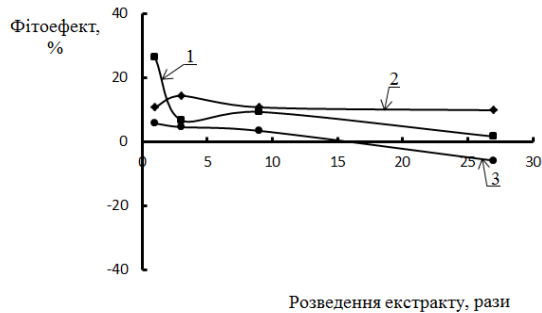
На рисунку 3 видно, що значення фіто ефектів для *Triticum L.* та *Hordeum vulgare* поступово зменшуються, що пов'язано з розведенням водних витяжок та, можливо, зменшення у них кількості алюмінію. Для *Avena satia L.* спостерігається стимулююча дія водної витяжки упаковки Tetra Pak, яка пов'язана з наявністю у водній витяжці мікроелементів у невеликих концентраціях.

На рисунку 4 видно, що значення фіто ефекту для *Avena satia L.* перевищує 20%, але при наступних розведеннях водної витяжки спостерігається стимулюючий ефект на ріст корінців, що, можливо, вказує на

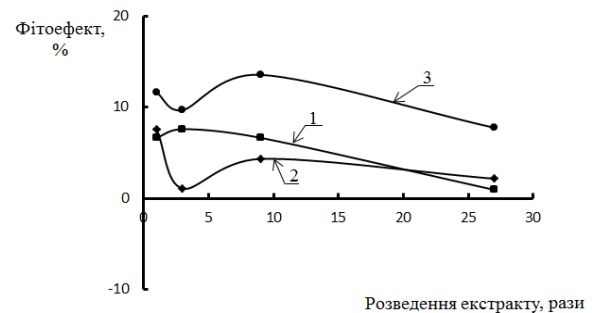
зменшення кількості важких металів у розведеннях. Для *Triticum L.* та *Hordeum vulgare* значення фітоефектів не перевищують 20% і поступово зменшуються у межах похибки.

Для *Avena satia L.* на обох графіках спостерігається різний характер кривих, на рис. 3 спостерігається зростання значень фітоефекту із збільшенням розведення, а на рис. 4 відбувається зменшення значень фітоефекту, тобто спостерігається залежність “розведення-ефект”. Такі відмінності можна пояснити тим, що *Avena satia L.* проявляє меншу чутливість до шкідливих речовин у водних витяжках.

Ідентично проведено фітотестування за допомогою фіто тест-об’єктів *Triticum L.*, *Avena satia L.*, *Hordeum vulgare* витяжок з пакувальних матеріалів на основі металу (рис. 5, 6).



1 – *Triticum L.*; 2 – *Avena satia L.*; 3 – *Hordeum vulgare*  
Рис. 5. Залежність фітоефекту від розведення екстракту з алюмінієвої упаковки



1 – *Triticum L.*; 2 – *Avena satia L.*; 3 – *Hordeum vulgare*  
Рис. 6. Залежність фітоефекту від розведення екстракту упаковки з білої жерсті

Фітотоксична дія спостерігається в *Triticum L.* у нерозведеній водній витяжці з алюмінієвої упаковки. У розчинах розведених дистильованою водою фітоефект менше 20%, тобто немає негативного впливу на тест-об’єкти.

На рисунках 5-6 спостерігається, що найбільш чутливим тест-об’єктом є *Triticum L.*, а найменше – *Avena satia L.* Чутливість тест-об’єктів до витяжок з різних видів пакувальних матеріалів є однаковою.

На графіках спостерігається зменшення ефекту гальмування в залежності від збільшення розведення водних витяжок металевих упаковок, спостерігається залежність “розведення-ефект”. На рис. 6 для кривої 2 присутнє зростання у межах похибки.

Для встановлення класу небезпеки та рівня нешкідливості паперової упаковки розраховано параметри фітотоксичності: середньоелективне і порогове розведення екстракту (табл. 1).

Таблиця 1

#### Параметри фітотоксичності для паперової упаковки

Упаковка	Фітотест-об’єкти	Регресійне рівняння	Коефіцієнт кореляції	LimR	BR <sub>50</sub>	Клас небезпеки
Tetra Pak	<i>Triticum L.</i>	$y = -0,022 \cdot x + 1,0149$	0,9089	3,7575	0,8221	4
	<i>Avena satia L.</i>	$y = -0,0386 \cdot x - 0,5251$	0,9057	0,0505	0,0035	4
	<i>Hordeum vulgare</i>	$y = 0,0214 \cdot x - 1,1622$	0,820	0,1844	0,1087	4
Кашована фольга	<i>Triticum L.</i>	$y = -0,1231 \cdot x + 0,2902$	0,9924	0,6733	0,0001	4
	<i>Avena satia L.</i>	$y = -0,0178 \cdot x + 0,6445$	0,699	1,9431	0,5682	4
	<i>Hordeum vulgare</i>	$y = -0,1549 \cdot x + 1,0097$	0,8071	0,008	0,0000002	4
Алюмінієва упаковка	<i>Triticum L.</i>	$y = -0,035 \cdot x + 1,1785$	0,7174	3,0095	0,2682	4
	<i>Avena satia L.</i>	$y = -0,0711 \cdot x + 0,5936$	0,945	1,4846	0,0109	4
	<i>Hordeum vulgare</i>	$y = -0,1012 \cdot x + 0,921$	0,7669	0,0789	0,00007	4
Біла жерсть	<i>Triticum L.</i>	$y = -0,122 \cdot x + 0,1573$	0,8586	0,1358	0,00003	4
	<i>Avena satia L.</i>	$y = -0,2651 \cdot x + 2,042$	0,9946	0,0005	≈0	4
	<i>Hordeum vulgare</i>	$y = -0,3686 \cdot x + 4,2154$	0,9652	0,0007	≈0	4



LimR – це розведення при якому фітотоксичний ефект становитиме 20%. Значення для пакувальних матеріалів, які менші за 1 не шкідливі для людини. Як видно з таблиці 2 поріг фітотоксичності LimR перевищено для Triticum L. при дослідженні водної витяжки з упаковки Tetra Pak та для Avena sativa L. при дослідженні водної витяжки з кашованої фольги.

ER<sub>50</sub> – це розведення при якому відбувається загибель 50% тест-об'єктів. Як видно з таблиці 2 значення для паперової упаковки низькі, це означає, що для отримання такого результату необхідно водні витяжки робити дуже концентрованими.

Середньоефективне розведення для усіх тест-об'єктів менші за 1 і фітотоксичний ефект зафіксований тільки при дії нативного екстракту, а його розведення не мають впливу на тест-об'єкти (фітотоксичність менше 20%), тому упаковці з кашованої фольги присвоюється 4 клас небезпеки – малонебезпечні.

Середньоефективне розведення для усіх тест-об'єктів менші за 1 і фітотоксичний ефект зафіксований тільки при дії нативного екстракту, а його розведення не мають впливу на тест-об'єкти, тому металевій упаковці присвоюється 4 клас небезпеки – малонебезпечні.

Ще одним способом визначення екологічної токсичності пакувальних матеріалів є фізико-хімічні методи.

Кількісний вміст в модельних середовищах ідентифікованих речовин не повинен перевищувати встановлені для них значення ДКМ (допустима кількість міграції).

Таблиця 2

**Концентрації шкідливих речовин, які містяться у паперовій упаковці**

Упаковка	Речовина	Концентрація, мг/л	ДКМ, мг/л	$\frac{C}{ДКМ}$
Tetra Pak	етилацетат	0,016	0,1	0,16
	формальдегід	0,0009	0,1	0,009
	ацетон	0,036	0,1	0,36
	метиловий спирт	0,012	0,2	0,06
	ізопропіловий спирт	0,011	0,1	0,11
	бутиловий спирт	0,011	0,5	0,022
	ізобутиловий спирт	0,011	0,5	0,022
	свинець	0,022	0,03	0,73
	цинк	0,36	1,0	0,36
	миш'як	0,01	0,05	0,2
алюміній	0,01	0,5	0,02	
Разом:				2,13
Кашована фольга	етилацетат	0,028	0,1	0,28
	формальдегід	0,0006	0,1	0,006
	ацетон	0,075	0,1	0,75
	метиловий спирт	0,015	0,2	0,075
	бутиловий спирт	0,011	0,5	0,022
	свинець	0,027	0,03	0,9
	цинк	0,42	1,0	0,42
	миш'як	0,01	0,05	0,2
алюміній	0,01	0,5	0,02	
Разом:				2,73
Алюмінієва упаковка	формальдегід	0,0007	0,1	0,007
	фенол	0,001	0,05	0,02
	свинець	0,07	0,03	2,33
	цинк	0,84	1,0	0,84
	алюміній	0,02	0,5	0,04
	епіхлоргідрин	0,01	0,1	0,1
дифенілолпропан	0,001	0,01	0,1	
Разом:				3,437
Біла жерсть	формальдегід	0,0006	0,1	0,006
	фенол	0,001	0,05	0,02
	свинець	0,06	0,03	2,0
	цинк	0,92	1,0	0,92
	алюміній	0,02	0,5	0,04
	епіхлоргідрин	0,01	0,1	0,1
дифенілолпропан	0,001	0,01	0,1	
Разом:				3,186



У таблиці 2 наведено перелік речовин, які містяться у паперовій упаковці і були визначенні фізико-хімічними методами.

У пакувальних матеріалах на основі паперу знайдено шкідливі речовини, але їх концентрація менша за ДКМ, що відповідає основним вимогам, які висуваються до паперових пакувальних матеріалів. У пакувальних матеріалах на основі металу знайдено шкідливі речовини. Концентрація свинцю у водній витяжці з алюмінієвої упаковки та з білої жерсті перевищує ДКМ. Свинець шкідливий для здоров'я людини, підвищення вмісту свинцю в продуктах харчування обумовлює збільшення його концентрації в крові, що може викликати отруєння. Концентрація усіх інших речовин менша за ДКМ, що відповідає основним вимогам, які висуваються до пакувальних матеріалів.

### Висновки

Методом біотестування встановлено, що відносна різниця оптичної густини для обраних пакувальних матеріалів на основі паперу однакова і становить 3,70%, а для металевих пакувальних матеріалів більша в упаковки з білої жерсті (4,17%), що не перевищує критерії токсичності.

За допомогою методу фітотестування встановлено, що для упаковки з Tetra Pak характерний більший фіто ефект, він становить 58,23%. За критерієм токсичності **BB<sub>50</sub>** встановлено, що паперова упаковка відноситься до 4 класу небезпеки. Серед металевої упаковки найбільший фіто ефект у алюмінієвої упаковки, що дорівнює 26,50%. За критерієм токсичності встановлено, що металева упаковка також належить до 4 класу небезпеки.

Фізико-хімічні методи показали, що сума відношень концентрації знайденої речовини у водних витяжках до значень ДКМ більше у кашованій фольги, яке дорівнює 2,73, а з металевої упаковки більше у алюмінієвої упаковки – 3,437. До того ж у пакувальних матеріалах на основі металу концентрація свинцю у водній витяжці з алюмінієвої упаковки та з білої жерсті перевищує ДКМ.

### Література

1. Сирохман І. В. Товарознавство пакувальних товарів і тари : підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. – К. : Центр учбової літератури, 2009. – 616 с.
2. Локс Ф. Упаковка и экология : учебное пособие / Локс Франс ; пер. с англ. О.В. Наумовой ; под ред. В.А. Наумова. – М. : Изд-во МГУП, 1999. – 220 с.
3. Біотестування. Сучасний стан практичного використання [Електронний ресурс] : стаття. – Режим доступу : [www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1\(41\)/142.doc.html](http://www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1(41)/142.doc.html).
4. Исидоров В.А. Введение в химическую экотоксикологию / В.А. Исидоров. – СПб : Химиздат, 1999. – 144 с.
5. Методические рекомендации по обоснованию класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности : МР 2.1.7.2297-07. – [Действует с 2007-28-10]. – М., 2007. – 9 с.
6. Целлюлоза, бумага, картон. Метод определения величины рН водной вытяжки : ГОСТ 12523 - 77. – [Введ. 1978–01–01]. – М. : Изд.-во стандартов, 1978. – IV, 6 с. : ил. ; 29 см.
7. Упаковка для пищевой продукции [Електронний ресурс] : стаття. – Режим доступу : [http://tovaroveded.ru/upakovka-i-khranenie-pishchevykh-produktov/227-upakovka\\_dlya\\_pischevoj\\_produkcii.html](http://tovaroveded.ru/upakovka-i-khranenie-pishchevykh-produktov/227-upakovka_dlya_pischevoj_produkcii.html).

### References

1. Syrokhman I. V. Товарознавство пакувальних товарів і тари : підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / I. V. Syrokhman, V. M. Zavhorodnia. – K. : Tsentr uchbovoi literatury, 2009. – 616 s.
2. Loks F. Upakovka i ekologiya : uchebnoe posobyie / Loks Frans ; per. s anhl. O.V. Naumovoi ; pod red. V.A. Naumova. – M. : Yzd-vo MHUP, 1999. – 220 s.
3. Biotestuvannia. Suchasnyi stan praktychnoho vykorystannia [Elektronnyi resurs] : stattia. – Rezhym dostupu : [www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1\(41\)/142.doc.html](http://www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1(41)/142.doc.html).
4. Isidorov V.A. Vvedenie v himicheskuyu ekotoksikologiyu / V.A. Isidorov. – SPb : Himizdat, 1999. – 144 s.
5. Metodicheskie rekomendatsii po obosnovaniyu klassa opasnosti othodov proizvodstva i potrebleniya po fitotoksichnosti : MR 2.1.7.2297-07. – [Deystvuet s 2007-28-10]. – M., 2007. – 9 s.
6. TSellyuloza, bumaga, karton. Metod opredeleniya velichiny rN vodnoy vyityajki : GOST 12523 - 77. – [Vved. 1978–01–01]. – M. : Izd.-vo standartov, 1978. – IV, 6 s. : il. ; 29 sm.
7. Upakovka dlya pischevoy produktsii [Elektronnyi resurs] : stattia. – Rejim dostupu : [http://tovaroveded.ru/upakovka-i-khranenie-pishchevykh-produktov/227-upakovka\\_dlya\\_pischevoj\\_produkcii.html](http://tovaroveded.ru/upakovka-i-khranenie-pishchevykh-produktov/227-upakovka_dlya_pischevoj_produkcii.html).

Рецензія/Peer review : 26.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Мандзюк І.А.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛАСТИЧНИХ БАНДАЖНИХ СТРИЧОК

*В статті проведено дослідження споживчих властивостей еластичної бандажної стрічки та аналіз сфер її використання. Досліджено параметри даної структури, релаксаційні характеристики еластичної бандажної стрічки та повітропроникність. На підставі проведених досліджень виявлено, що еластична трикотажна стрічка є формостійкою, відповідає всім нормативам і може використовуватися для виготовлення бандажів та інших медичних виробів. Еластична трикотажна стрічка вироблена на базі утокового переплетення. Еластичність матеріалу задається поліуретановою ниткою, яка вводиться в структуру як повздовжній уток. Структура переплетення еластичної стрічки утворюється за допомогою трьох гребінок.*

*Ключові слова: уток, основова'язаний трикотаж, еластичний, параметри структури, деформаційні характеристики, повітропроникність.*

N.M. LYTVYNNENKO

Kyiv National University of Culture and Arts

### RESEARCH OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ELASTIC BANDING TAPE

*The article conducted a study of consumer properties of an elastic banding tape and an analysis of its use. The parameters of this structure, the relaxation characteristics of the elastic banding and air permeability are investigated. On the basis of the conducted research, it was revealed that the elastic knitted tape is form-stable, meets all standards and can be used for the manufacture of bandages and other medical products. The elastic knitted tape is made on the basis of weavers on the warp knitting machine. Tapes from these machines have a soft cover, are not released, and also withstand reusable washing without deterioration in functional properties. The quality and density of the tape with the use of electrometric yarns is influenced by the type and density of the cord weave. Therefore, the properties of tapes, depending on the nature and nature of the raw materials, as well as the weaves, can vary considerably. The weave structure of an elastic ribbon is formed with the help of three dies. The elasticity of the material is given by a polyurethane thread, which is introduced into the structure as a longitudinal weft. As a weave interlacing, a weaving chain was selected, which is combined with a transient and longitudinal weft. In order to ensure the closure of the grapping tape, a special thread with a polyester yarn on one and the other side of the tape is placed. Elastic banding tape has a very complex looped structure, which is worked with no less complex on the structure of the threads, which have a strong elastic properties, stiffness, rubbing. When making an elastic band on a basic knitting machine, the elastic thread is fed in the tensioned state and is earned in the stitches of the weave of the chain. When removing the tape from the machine, after knitting is finished, the elastic tape is susceptible to shrinkage, ie the loop loops are placed under the slope. Therefore, in calculating the parameters of the looped structure, the coefficient of shrinkage or coefficient of relative elongation of the electrometric thread is assumed.*

*Keywords: ducks, knitwear, elastic, structural parameters, deformation characteristics, air permeability.*

### Постановка проблеми

Медичний та технічний текстиль сьогодні – це підгалузі текстильної індустрії, що найбільш динамічно розвиваються. Перспективи розвитку вітчизняної текстильної промисловості слід пов'язувати з тенденціями розвитку світового ринку текстилю. Домінантою серед них є, по-перше, високі темпи розвитку ринку медичного текстилю, по-друге, спеціалізація розвинутих країн з виробництва переважно медичного текстилю, по-третє, широке застосування нанотехнологій у його виробництві [1].

З поширенням різних хвороб у світі набрав оберти у своєму розвитку медичний текстиль. Адже все частіше люди хворіють хворобами попереково-крижового відділу, захворюванням вен, травматизмом кінцівок чи хребта та ін. Саме для профілактики та лікування цих хвороб застосовують еластичні стрічки. Також еластичні стрічки використовуються для виробництва білизни, спортивних товарів, спецодягу, корсетних виробів, ортопедичних товарів, поясів спідниць та брюк, взуття та ін. Це відкриває широкі можливості застосування еластичної стрічки в різноманітних сферах.

На сьогоднішній день в Україні є досить багато підприємств, що виготовляють еластичні стрічки як технічного, так і медичного призначення. Адже з кожним днем все більше людей хворіє на варикозне розширення вен, травматичні та ортопедичні проблеми і т.д.

Медичний текстиль із застосуванням еластомерних ниток використовується в усьому світі, і Україна не є винятком. Як відомо, досить давно існують певні проблеми в розвитку легкої промисловості України, але вона все ж намагається забезпечити даним асортиментом населення, що його потребує. З кожним роком трикотажна галузь України пропонує розробку та виготовлення виробів медичного та технічного призначення. Трикотажні еластичні вироби користуються дуже великим попитом сьогодні, а особливо еластичні бинти, бандажні вироби – тобто ті вироби, для виготовлення яких необхідна стрічка з вмістом еластомерної нитки [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні десятиліття в текстильній промисловості сформувалась нова галузь – виготовлення виробів та матеріалів медичного призначення. Для їх отримання використовують класичні технологічні процеси: плетіння, ткацтва та в'язання [2].

Різноманітність способів виготовлення, постійне розширення асортименту дали необхідність

розробки питань класифікації текстильних виробів, що застосовуються в медицині. Систематизація цих виробів та сировини, що використовується для їх виготовлення, дозволяє розкрити можливості кожного способу виробництва, правильно обрати сировину та розробити оптимальну технологію виготовлення конкретних виробів, матеріалів, а також передбачити можливість створення нових видів виробів чи проектування їх властивостей.

В основу класифікації виробів покладений спосіб їх виготовлення. Згідно з цією класифікацією всі вироби можуть бути розділені на чотири класи:

- ткани;
- трикотажні;
- неткані;
- плетені.

Залежно від призначення медичні вироби та матеріали кожного підкласу поділяються на три групи:

- санітарно-гігієнічні;
- лікувально-профілактичні;
- хірургічні.

Санітарно-гігієнічні вироби – це вироби та матеріали, що виготовляються з натуральної чи штучної сировини та забезпечують виконання санітарних вимог для різних професій.

Лікувально-профілактичні вироби – це вироби та матеріали різної структури, що здатні попередити захворювання [2].

Хірургічні – це вироби та матеріали, що виготовляються в основному з синтетичної сировини та використовуються для операційного лікування з метою фіксування та відновлення форм, функцій окремих органів та тканин.

До виготовлення еластичних виробів медичного призначення висуваються наступні вимоги відповідно до ГОСТ Р 51219-98[3]:

- зміна лінійних розмірів виробу після першого прання (усадка) повинно бути не більше 20% його лінійних розмірів до прання;
- значення розривного навантаження, розтяжності, робочої розтяжності виробів після прання повинні бути не менше стандартних значень приведених в [4];
- значення розривного видовження виробів повинно бути не менше значення розтяжності;
- зміна значення розривного навантаження виробів після прання повинно бути не більше 20% їх розривного видовження до прання.

Бандаж повинен бути зроблений з матеріалу, що пропускає повітря («дихає») і вбирає вологу (піт).

У кожній вищезгаданій класифікації є така підгрупа як перев'язувальні матеріали. Асортимент волокнистих перев'язувальних матеріалів дуже різноманітний. Це еластичні стрічки, еластичні бинти, бандажі та ін. Сьогодні еластичні стрічки мають дуже широкі сфери застосування. В основному їх використовують для виготовлення бандажів та білизни:

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Розглянувши різні джерела літератури, статті, патенти, стало зрозумілим, що з кожним днем все більшого розвитку набуває трикотажна промисловість, а особливо розвиток медичного трикотажу. Вчені та лікарі все більше займаються розробкою нових видів трикотажних полотен медичного призначення. Велику популярність в цьому напрямку отримали еластичні стрічки, які дуже широко використовуються в медицині, в виготовленні взуття, білизни та в спорті [5].

При виробництві еластичних стрічок залишається актуальним питанням забезпечення якості та функціональних вимог. Для їх забезпечення виготовляють стрічки з вмістом еластомерних ниток. Особливістю еластомерних ниток є підвищена пружність у порівнянні із звичайними нитками. Еластомерні нитки мають пружні деформації, непропорційні діючим зусиллям.

Для створення мікроклімату тіла людини важливим показником є повітропроникність, яка залежить від властивостей волокон і складових їх ниток, в великій мірі залежить від пористості, кількості та величини відкритих пор, а також від товщини полотна.

#### **Мета статті**

Головною метою цієї роботи є дослідження споживчих властивостей еластичної стрічки.

Необхідність вивчення параметрів петельної структури викликана збільшенням асортименту трикотажних виробів медичного призначення, до яких висуваються підвищені вимоги при фарбуванні, при експлуатації виробів та при інших видах обробки. Параметри петельної структури є одними з найважливіших для трикотажних виробів і матеріалів, мають велике значення для виробів санітарно-гігієнічного та лікувально-профілактичного значення.

Відповідно до поставленої мети в статті вирішувалося наступне завдання: експериментально досліджувались деформаційні властивості та повітропроникність еластичної стрічки, а саме подвійного еластичного основов'язаного трикотажу для бандажних виробів.

#### **Виклад основного матеріалу**

З кожним днем попит на трикотаж з вмістом еластомерних ниток збільшується. І саме цей трикотаж привертає до себе увагу науковців, як зарубіжних, так і вітчизняних. Один із шляхів створення конкурентоспроможного трикотажу – використання еластичних ниток; волокон з різними

вологопоглинаючими властивостями, що забезпечують швидке відведення вологи від тіла; а також використання багатoshарових матеріалів, які складаються з різнорідних ниток та забезпечують спрямований ефект теплопровідності, вологопередачі і т.п.

Сфера застосування трикотажних матеріалів постійно розширюється в області побутової продукції, технічних потреб промисловості та інших галузях народного господарства. Нові потреби стимулюють створення нових полотен зі специфічними фізико-механічними властивостями. Адже застосування в трикотажному виробництві еластичних ниток дозволяє отримувати вироби з компресійним ефектом для спорту і медицини, що володіють високою пружною деформацією, формостійкістю, зносостійкістю, стабільністю в різних умовах експлуатації [6].

В роботі досліджено еластичну трикотажну стрічку, яка вироблена на базі утокового переплетення за допомогою 3 гребінок. Еластичність стрічки надається введенням в структуру в якості повздожнього утку поліуретанової нитки (гребінка Г1) лінійною густиною 125 текс і має повну проборку. Гребінка Г1 виконує зсув в кожному петельному ряді. Тобто в такому випадку еластомерна нитка розташовується між остовами петель ланцюжка та між його протяжками в кожному петельному стовпчику. Грунт переплетення утворений гребінкою Г3, яка утворює закриті петлі ланцюжка поліефірною ниткою лінійної густини 16,7 Текс, саме тому з однієї сторони видно остов петлі, а з іншої протяжки під якими розташовані уточні нитки. Проборка гребінки Г3 повна. Для більшої застилистості трикотажу, з обох сторін поліуретанової нитки прокладається поперечний уток (гребінка Г2) із текстурованої високооб'ємної поліефірної нитки лінійною густиною 33,4 текс, який розташований під остовом та протяжкою ланцюжка. Проборка гребінки Г2 неповна.

Як бачимо, трикотажне полотно має дуже складну петельну структуру, яка виробляється з неменш складних за структурою ниток, що володіють пружно еластичними властивостями, жорсткістю, тертям. Це викликає складну поведінку трикотажу в процесі його виготовлення та експлуатації. Крім того, трикотаж у реальних умовах знаходиться не врівноваженому, а у відносно стійкому стані, що, в свою чергу, погіршує вивчення його поведінки без знання параметрів петельної структури полотна.

Дослідження товщини зразку еластичного трикотажу проводимо за допомогою товщиноміра TP-25 [7].

Таблиця 1

**Розрахункові та експериментальні значення параметрів структури еластичного трикотажу**

	Параметри петельної структури							
	A, мм	B, мм	$N_{c, \text{пет.ст.}}$	$Np_{\text{пет.р}}$	$l_{л, \text{мм}}$	$l_{ел, \text{мм}}$	$m_s, \text{г/м}^2$	M, мм
Теоретичний розрахунок	0,6	0,42	166,00	238,0	1,76	0,41	319	2,1
Експериментальні дослідження	0,62	0,43	160	230	1,92	0,40	334	2,1

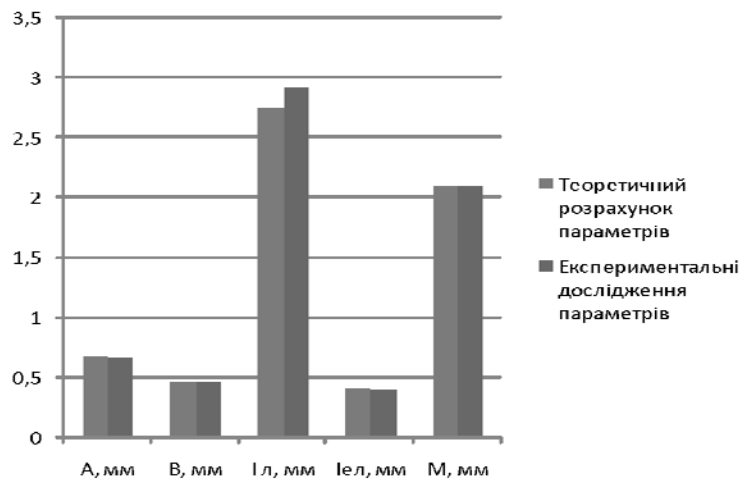


Рис. 1. Порівняння теоретичних та експериментальних значень параметрів еластичного трикотажу

З даних діаграми бачимо, що значення експериментальних досліджень та теоретичного розрахунку параметрів структури трикотажу майже не відрізняються – відхилення становить від 1% до 4%. Тобто проектування параметрів еластичної стрічки проведено вірно, так як похибка значень теоретичних розрахунків кількості петельних рядів, довжини ниток в петлях, поверхневої щільності від значень експериментальних досліджень становить від 0,6% до 4%.

Для дослідження релаксаційних характеристик використано стійку-релаксометр, що призначена для визначення одно циклових характеристик трикотажу. Результати розрахунків повної деформації та її складових часток представимо в таблиці 2.

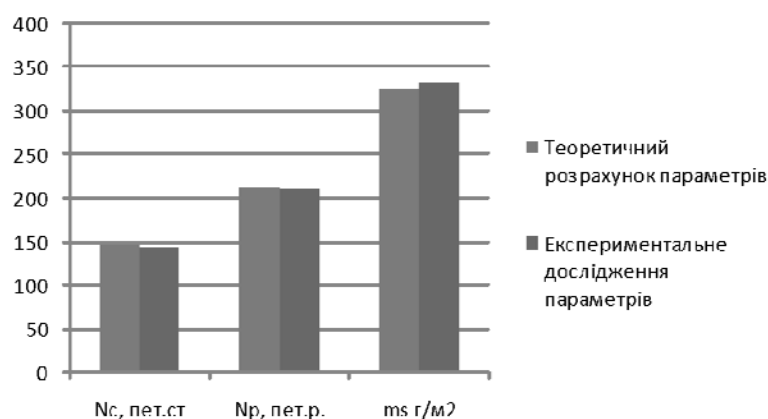


Рис. 2. Порівняння теоретичних та експериментальних значень кількості пет. рядів та пет. стовпчиків, поверхневої щільності зразка

Таблиця 2

### Релаксаційні характеристики залежно від часу дії навантаження трикотажної стрічки

Номер зразка	Повна деформація $\varepsilon(t)$ , %	Складові частини деформації, %			Частка складової частини деформації		
		$\varepsilon_{шв.зв.}$	$\varepsilon_{пов.зв.}$	$\varepsilon_{зали}$	Швидко зворотна $\Delta\varepsilon_{шв.зв.}$	Повільно зворотна $\Delta\varepsilon_{пов.зв.}$	Залишкова $\Delta\varepsilon_{зали}$
1	185	175	9	1	0,94	0,048	0,005
2	184	172	11	1	0,93	0,059	0,005
3	185	173	12	0	0,93	0,064	0,0
4	184	173	10	1	0,94	0,054	0,005
5	185	173	10	1	0,93	0,054	0,005

На основі даної таблиці будемо діаграму (рис. 3), на якій зображені частки складових частин деформації еластичної бандажної стрічки.

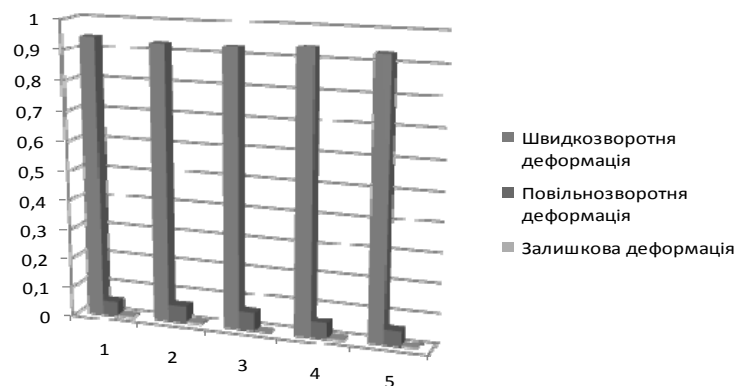


Рис. 3. Показники частки складових частин деформації зразків з підприємства «Алком»

Отже, з даної діаграми можна зробити висновки, що еластична трикотажна стрічка відповідає всім стандартам та вимогам до трикотажних еластичних виробів медичного призначення. Відхилення по показникам релаксаційних характеристик знаходиться в межах 1%. Еластична бандажна стрічка є досить пружною і формостійкою, оскільки залишкова деформація дорівнює 0,8%, а повільнозворотня деформація складає 10,4%.

Метод визначення повітропроникності, полягає в вимірі об'єму повітря, що проходить крізь задану площину випробувального матеріалу за одиницю часу при визначеному розрядженні під точковою пробєю. При проведенні випробування використано прилад марки ATL – 2(FF – 12), що забезпечує вимірювання повітропроникності в діапазоні від 2,5 до 10750 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с; розрядження під точковою пробєю 49 Па (5 мм вод. ст.); силу стискання точкової проби 147 Н (кгс). Результати досліджень експериментальних зразків на повітропроникність представлені в таблиці 3.

На основі даних таблиці 3 будемо гістограму результатів повітропроникності еластичного основ'язаного трикотажу, яка представлена на рис. 4.

**Повітропроникність експериментальних зразків еластичної трикотажної стрічки**

Номер зразка	Кількість повітря V, л/год					V <sub>сер</sub>	Q <sub>max ml</sub>
	2						
1	161	165	161	160	165	162	4,5
2	157	160	155	162	155	158	4,4
3	156	152	150	152	145	151	4,2
4	151	155	149	145	150	150	4,1
5	156	150	146	150	155	151	4,2
6	162	155	164	160	153	158	4,4
7	160	164	155	150	158	157	4,3
8	158	161	163	160	160	160	4,4
9	157	164	155	158	160	159	4,4
10	156	157	160	159	159	158	4,4

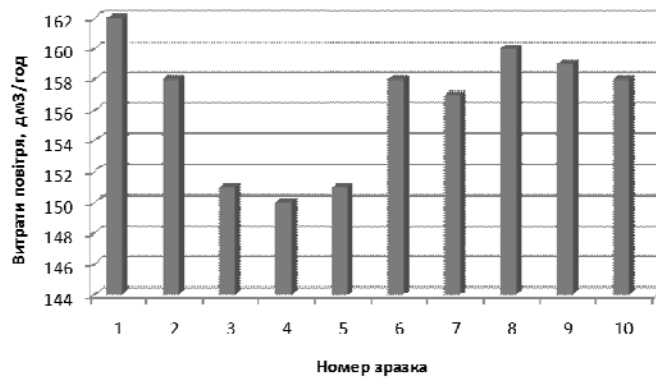


Рис. 4. Діаграма повітропроникності трикотажу

Визначено, що повітропроникність еластичної трикотажної стрічки, виготовленої з поліефірних текстурованих та поліуретанових ниток низька, це обумовлено великою щільністю зразків трикотажу. Сировинний склад трикотажних зразків, відіграє значний вплив на властивості повітропроникності, це зумовлено фізико-механічними властивостями сировини, так як еластомерні нитки, взагалі не пропускають повітря.

Різниця показників повітропроникності, яка представлена на діаграмі 3 обумовлена тим, що при виготовленні всіх зразків еластичної стрічки довжина нитки в петлі змінювалась, що призвело до різної щільності петельної структури, за рахунок чого обумовлена різниця показників.

Для більш наглядного уявлення від чого ж залежить повітропроникність основов'язаного еластичного трикотажу, представимо діаграму залежностей повітропроникності від кількості петельних рядків (рис. 5).

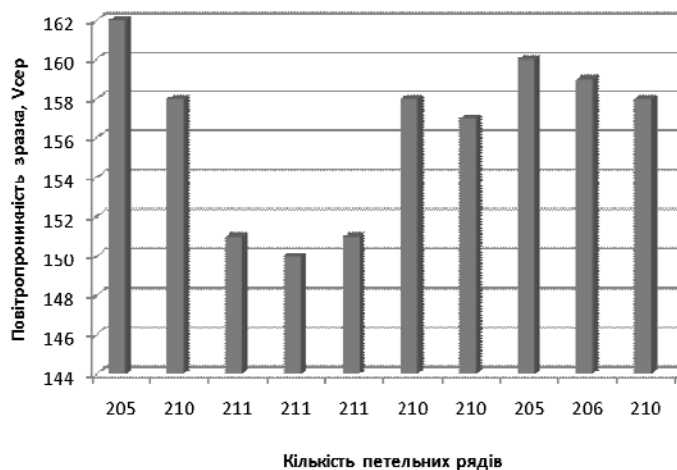


Рис. 5. Діаграма залежностей повітропроникності від кількості петельних рядків

Показники повітропроникності при зміні кількості петельних рядків від максимального до мінімального значення в зразках трикотажу змінюються. Це пояснюється тим, що при мінімальній кількості рядків, трикотаж має менш щільну структуру, тобто його пористість зростає, що забезпечує зменшення перешкод для проходження повітря. А при максимальній кількості рядків, навпаки, щільність полотна збільшується, при цьому його пористість набагато зменшується, що забезпечує перешкоду для проходження повітря.

### Висновки

З кожним днем в усьому світі та й в Україні набирає обертів розвиток медичного текстилю. На сьогоднішній день виробництво медичного трикотажу становить приблизно 10% від технічного текстилю. Трикотажні вироби медичного призначення користуються великою популярністю у зв'язку з профілактикою таких захворювань, як: варикозне розширення вен, рецидиви після оперативного лікування, остеохондроз, реабілітація після травм, ударів та ін. Тому виробництво цих виробів є досить продуктивним на сьогодні.

Дана робота присвячена дослідженню основов'язаної бандажної стрічки з вмістом еластомерної нитки. В якості ґрунтового переплетення обрано ланцюжок, який поєднується з поперечним та повздовжнім утком. Пружність та еластичність матеріалу задається поліуретановою ниткою, яка введена в структуру як повздовжній уток. Для забезпечення застилистості трикотажу прокладено поперечний уток з поліефірної нитки з одного та іншого боку стрічки.

Параметри даної структури було визначено за допомогою розрахунків та експериментально. Довжина нитки в петлі ґрунту була визначена експериментально і склала 1,92%, що на 4% більше від розрахункового значення, але це є в межах норми. Щільність по вертикалі менша на 3,5% від розрахункового значення і дорівнює 230 рядів. Щільність по горизонталі склала 160 петельних стовпчиків. Поверхнева густина дорівнює 334 г/м<sup>2</sup>. Загалом відхилення між розрахунковими на експериментальними значеннями параметрів структури склало від 0,6% до 4%.

Також було досліджено релаксаційні характеристики трикотажу та повітропроникність. Виявлено, що повітропроникність еластичної трикотажної стрічки, виготовленої з поліефірних текстурованих та поліуретанових ниток низька і дорівнює 4,3 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>, це обумовлено великою щільністю зразків трикотажу. Було досліджено також, що дана стрічка є формостійкою, має залишкову деформацію 0,8%, і відповідає всім нормативам. Для виготовлення даної еластичної стрічки пропонується основов'язальне обладнання з електронним управлінням гребінок таких фірм, як Jacob Muller A.G. (Швейцарія), COMEZ, Karl Mayer та ін.

### Література

1. Распространенные товары медицинского назначения [Электронный ресурс] : Знайтовар. – 2017. – № 4. – С. 21. – Режим доступа : <http://www.znaytovar.ru>
2. Кукин Г.Н. Текстильное материаловедение (волокна и нити) : учеб. для вузов / Г.Н. Кукин, А.Н. Соловьев, А.Н. Кобляков. – 2-е изд. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 352 с.
3. Изделия медицинские эластичные фиксирующие и компрессионные. Общие технические требования. Методы испытаний : ГОСТ 16218.9-89. – [Чинний від 1991 – 07 - 01]. – М. : Издательство стандартов, 1999.
4. Хартманн П. Медицинские технологии [Электронный ресурс] / Пауль Хартманн // Медицинские технологии. – 2018. – № 1 – С. 19. – Режим доступа : [http://www.combisensation.ru/library/library/nauchnye\\_stati/Kompressionnaya-terapiya-zabolevanij-ven-nizhnih-konechnostej/](http://www.combisensation.ru/library/library/nauchnye_stati/Kompressionnaya-terapiya-zabolevanij-ven-nizhnih-konechnostej/)
5. Новые материалы при изготовлении медицинских изделий [Электронный ресурс] // Новые материалы. – 2015. – № 6 – С. 45. – Режим доступа : <http://tiddlypom.ru>
6. Шапалина А.С. Разработка ассортимента и технологии изготовления компрессионного медицинского трикотажа : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н : 01.03.93 / Шапалина Анна Сергеевна. – М., 1993. – 275 с.
7. Материалы текстильные. Полотна. Метод определения толщины : ГОСТ 12023-93. – [Чинний від 01.12.2005]. – М. : Издательство стандартов, 2005.

### References

1. Common Medical Supplies [Electronic Resource]: Znaytovar magazine. – 2017. – № 4 – P. 21. – Mode of access: <http://www.znaytovar.ru>
2. Kukin G.N. Textile materiel (volokna and thread): studies / G.N. Kukin, A.N. Soloviev, A.N. Koblyakov. Textbook for universities, 2nd edition. – M.: Legprumbyzdat, 1989 – 352 s.
3. GOST 16218.9-89. Medical elastic fixation and compression products. General technical requirements. Test methods. – [Chinniy vid 1991 - 07 - 01]. – M.: Publishing Standards, 1999.
4. Medical Technologies Paul Hartmann [Electronic Resource]: Journal of Medical Technologies. – 2018. – № 1 – P. 19. – Mode access to the journal: [http://www.combisensation.ru/library/library/nauchnye\\_stati/Kompressionnaya-terapiya-zabolevanij-ven-nizhnih-konechnostej/](http://www.combisensation.ru/library/library/nauchnye_stati/Kompressionnaya-terapiya-zabolevanij-ven-nizhnih-konechnostej/)
5. New materials in the manufacture of medical products [Electronic Resource]: the magazine New Materials. – 2015. – № 6 – P. 45. – Mode Access: <http://tiddlypom.ru>
6. Shapalina A.S. "Development of assortment and technology of manufacture of compressional medical recording". Ph. D.: 01.03.93 / Shapalina Anna Sergeevna. – M., 1993. – 275 s.
7. GOST 12023-93. Textile materials. Flying. Method of determining the thickness. [Chinniy vid 01.12.2005]. M.: Publishing house of standards, 2005.

Рецензія/Peer review : 31.08.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Галавська Л.Є.

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-76-84  
УДК 621.396.96

Ю.М. БОЙКО, О.І. ЄРЬОМЕНКО, О.В. КОСТЕНКО  
Хмельницький національний університет

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕКОДУВАННЯ САМООРТОГОНАЛЬНИХ КОДІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ІЗ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

*Розглянуто основні принципи синтезу самоортогональних кодів. Наведено етапи модифікації самоортогональних кодів та описано принципи побудови структури синдрому для декодування. Описано методику оптимізації швидкості передачі інформації та займаної смуги частот телекомунікаційного каналу, за рахунок адаптації використаного декодера до його стану, в умовах реального комплексу завад. Проведено порівняння ефективності процесів м'якого та жорсткого декодування шляхом дослідження імітаційної схеми каналу передачі інформації з адитивним білим гаусівським шумом. Визначено ефективність багатопорогового декодування згорткових та блокових кодів з графіків завадостійкості у випадку зміни кількості ітерацій при декодуванні. Досліджено можливості адаптивного налаштування параметрів декодера, зокрема адаптивного налаштування порогу на різних ступенях ітерацій.*

*Ключові слова: телекомунікаційні технології, декодер, сигнально-кодова конструкція, адаптивне декодування.*

J.M. BOIKO, O.I. EROMENKO, O.V. KOSTENKO  
Khmelnytskyi National University

## ANALYSIS THE EFFECTIVENESS OF DECODING SELF-ORTOGONAL CODES IN TELECOMMUNICATION CHANNELS WITH PHASE KEYING MODULATION

*In this paper represents the basic principles of the synthesis of self-orthogonal codes. The stages of modification of self-orthogonal codes are considered and the principles of constructing a syndrome structure for decoding are described. The technique of optimizing the speed of information transmission and occupied band of frequencies of the telecommunication channel is described, due to the adaptation of the decoder used to its state in the conditions of the real complex of interferences. Comparison of the efficiency of soft and hard decoding processes is carried out by studying the simulation scheme of the channel of transmission of information with the additive white Gaussian noise. The efficiency of multi-threshold decoding of convolutional and block codes from noise immunity charts in case of change of the number of iterations during decoding is determined. The possibilities of adaptive adjustment of decoder parameters, in particular adaptive threshold setting at various stages of iteration, were investigated. The adaptive decoding mechanism is generally based on the fact that the multi-threshold decoder contains a set of information and verification branches, and thus allows you to manage redundancy by connecting or excluding checking branches. Then, the adaptation process was reduced to the receiver's assessment of the signal/noise ratio in the telecommunication channel and the adaptive selection based on such an estimate from a certain code set that would have the maximum code speed and provided the given reliability. The presence of a significant level of noise in the channel will necessitate the use of a powerful code with more decoding iteration. A low noise level will result in the need to use a less powerful code and a smaller number of decoding iterations. The proposed algorithm makes it possible adaptively to change the parameters of the encoder and the decoder under the state of the telecommunication channel, taking into account the intensity of the noise. The possibilities of practical realization of decoding from correction of independent errors, correction of error packages, diffuse codes that correct independent errors and error packs generated by code sequences of maximum length in particular and by application of adaptive algorithms are devoted.*

*Keywords: telecommunication technology, decoder, signal-code constructions, adaptive decoding.*

**Вступ.** Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій на сучасному етапі впровадження стандартів зв'язку четвертого і п'ятого поколінь, розвиток супутникового зв'язку, систем телеметрії тощо, ставить перед дослідниками цілком конкретні завдання які пов'язанні із забезпеченням необхідних показників якості цифрових каналів передавання інформації [1]. Враховуючи дані обставинами, слід зазначити, що сучасні засоби телекомунікацій, крім високої стійкості до впливу завад та надійності при виправленні помилок, повинні мати надзвичайно високі швидкості при обробці даних. Ще один аспект який слід виділити – пошук оптимальних, в сенсі мінімізації часових і обчислювальних ресурсів кодеків та декодерів, є невід'ємною потребою перспективних засобів телекомунікацій. Розвиток телекомунікаційних стандартів і технологій зв'язку, таких як 4G (LTE), 5G, IEEE 802.3an (10G Ethernet), IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11n (WiFi), IEEE 802.16e (WiMAX), систем супутникового зв'язку та передачі даних, телеметрії, систем цифрового телебачення форматів DVB-S, DVB-S2X, ISDB-Tmm, DVB-T2 та інші, спонукає дослідників до необхідності пошуку методів кодування/декодування, здатних функціонувати на швидкостях які досягають десятків ГГц при одночасному забезпеченні необхідного рівня завадостійкості [2]. В цьому випадку доцільна відмова від довгих каналів зворотного зв'язку, які безпосередньо впливають на зниження швидкості просування передачі даних. Крім того, реалізація схем декодування повинна по можливості уникати ситуації, коли об'єм обчислень на один декодований символ виявляється випадковою величиною і для проведення ефективного декодування слід будувати більш складні схеми декодерів.

Найбільш широке застосування на сучасному етапі розвитку телекомунікаційних технологій отримали такі способи кодування, як перевірка на парність (LDPC), коди Хеммінга, коди які містять циклічні перевірки для виявлення помилок, згорткові коди, каскадні коди, недвійкові коди, турбокоди і т. д. [3]. Вирішення завдань реалізації схем та алгоритмів декодування за умови уникнення ситуації коли об'єм



обчислень на один декодований символ виявляється випадковою величиною, можливий шляхом застосування методу порогового декодування який вперше був запропонований Д. Мессі. Досить актуальним на поточний момент є також метод багатопорогового декодування, який дозволяє декодувати дуже довгі коди з лінійною від довжини коду складністю виконання. Огляд літературних джерел [2–5] дозволяє констатувати, що багатопорогові декодери самоортогональних кодів є достатньо ефективним засобом вирішення завдань підвищення якості та швидкості декодування. Таким чином, необхідність вирішення негайних завдань теорії та практики використання завадостійких кодів у засобах телекомунікацій, утворює важливу науково-технічну задачу, яка полягає у пошуку методів мінімізації розмноження помилок у випадку порогового декодування, локалізацією пакетних помилок та синтез кодів з ефектом мінімального розмноження помилок які забезпечують високу якість передачі інформації у телеметричних та телекомунікаційних каналах передачі інформації.

У статті проведений огляд і вивчення методів багатопорогового декодування, розглянуто методи побудови та декодування довгих кодів. Особливу увагу приділено можливості практичного реалізації декодування з виправлення незалежних помилок, виправлення пакетів помилок, дифузних кодів, які виправляють незалежні помилки та пачки помилок утворені кодовими послідовностями максимальної довжини зокрема і шляхом застосування адаптивних алгоритмів.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій та принципи синтезу самоортогональних кодів

Серед кодів, що допускають порогове декодування, найбільше поширення знайшли самоортогональні коди [5]. Розглянемо принципи синтезу таких кодів. Згортковий код, для якого при будь-якому  $i=1,2,\dots,k_0$  система перевірок, яка контролює шумовий символ  $e_0^{(i)}$  який впливає на інформаційний символ в момент часу  $t=0$ , ортогональна відносно  $e_0^{(i)}$ , називається самоортогональним кодом. Слід зазначити, що усі самоортогональні коди допускають повну ортогоналізацію, тобто за допомогою мажоритарного декодування можна виправити усі помилки, виправлення яких гарантується мінімальною відстанню. Декодування самоортогональних кодів виконується за умови, що відповідним чином обрані символи синдромів ортогональні відносно  $e_u^{(i)}$  і у випадку декодування немає необхідності здійснювати лінійне перетворення символів синдромів для отримання складових перевірок. Таким чином, код є ортогональним тоді коли сукупність символів синдромів, які контролюють кожен інформаційний шумовий символ  $e_u^{(i)}$  (шумовий символ, який опинився в момент часу  $u$  у  $i$ -й прийнятій послідовності), ортогональна відносно  $e_u^{(i)}$ . Отже, якщо при будь-яких  $u \geq 1$  сукупність символів синдромів які контролюють  $e_u^{(i)}$ , ортогональна відносно  $e_u^{(i)}$ , тоді ця властивість ортогональності виконується і у випадку  $u = 0$  код є самоортогональним.

Утворення самоортогональних кодів здійснюється за допомогою породжувальних поліномів різниці трикутники яких не містять однакових елементів. Задамо поліном у виді  $G(x) = 1 + x + x^4 + x^6$ . Перевірочна матриця яка відповідає усіченим синдромам і шумовим послідовностям, для вибраного коду буде мати вигляд:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Отриманий код буде самоортогональним так як множина компонентів  $s_i$  синдрому  $S$  містить в якості доданків помилку в першому інформаційному символі:

$$\begin{aligned} s_0 &= e_0 + e_{0v}; \\ s_1 &= e_0 + e_1 + e_{1v}; \\ s_4 &= e_0 + e_3 + e_4 + e_{4v}; \\ s_6 &= e_0 + e_2 + e_3 + e_6 + e_{6v}. \end{aligned} \quad (2)$$

Причому, компоненти синдрому є ортогональними відносно помилки  $e_0$ . У виразі (2) помилка  $e_i$  визначає помилку у  $i$ -му інформаційному символі, а  $e_{iv}$  -  $i$ -му перевірконому символі.

Модифікацією ортогональних кодів є ортогоналізовані коди. Загалом саме з ортогоналізованими кодами будуть проведені дослідження підвищення ефективності декодування інформації в засобах телекомунікацій. Тому доцільно розглянути принципи їх побудови, враховуючи особливості синтезу самоортогональних кодів. Особливість ортогоналізованих кодів полягає в тому, що вони піддаються пороговому декодуванню [3–6]. Порівняно з розглянутими самоортогональними кодами дані коди можуть



Лінійне перетворення за допомогою якого за синдромом знаходять складові перевірки, при декодуванні з оберненим зв'язком звичайно задають матрицею розміру  $J \times (m+1)$ . Кожен стовбець цієї матриці лінійного перетворення містить не більше одного ненульового елемента, а для самоортогональних кодів не більше ніж один ненульовий елемент входить і в кожну стрічку цієї матриці. У випадку самоортогональних кодів матриця лінійного перетворення визначається однозначно побудовою структури синдрому. Крім того, у випадку завдання ортогоналізованих кодів необхідно вказувати не лише породжувальний багаточлен, але і лінійне перетворення за допомогою якого за синдромом обчислюються складові перевірки.

Підсумовуючи вищезазначене слід відмітити, що побудова ортогоналізованих кодів і лінійних перетворень для її ортогоналізації здійснюється повністю методом перебору.

У ході дослідження доцільно розглянути основні аспекти синтезу декодера самоортогональних кодів.

Синтез багатопорогового декодера будемо здійснювати шляхом застосування ітеративного алгоритму, що загалом дозволить наблизити схемну реалізацію декодера до оптимальної в широкому діапазоні кодових швидкостей і рівнів шуму в телекомунікаційному каналі. Реалізація багатопорогового декодера повинна проводитись таким чином, щоб за швидкодією синтезовані схеми не програвали пороговим [3]. Саме ця обставина, створює можливості для застосування таких схем декодерів у сучасних високошвидкісних телекомунікаційних стандартах зв'язку.

Використаємо двійковий лінійний систематичний блоковий та згортковий самоортогональний код, який застосовується у телекомунікаційному каналі для передачі  $k$  повідомлень з двійкових символів. Після кодування загальна кількість символів буде дорівнювати  $n$  ( $n > k$ ). Нехай внаслідок передавання даної інформації у каналі з фазовою маніпуляцією (двійковий симетричний канал), декодер внаслідок наявності шумів і завад отримає замість кодового слова  $\bar{C}_0$ , спотворене шумами повідомлення  $\bar{Y}$  довжиною  $n$ .

Обчислюємо синдром  $\bar{S} = \bar{Y}H^T$  прийнятого з повідомлення і для кожного інформаційного символу  $i_j$ ,  $1 \leq j \leq k$  виділимо множину  $\{S_{jk}\}$  елементів синдрому з номерами  $\{j_k\}$  які будуть перевірками відносно символу  $u_j$ . Нехай ця множина містить в якості доданку помилку  $e_j$  в кожному символі. Схему декодера

представимо на рис. 1 [6]. Введемо додатково двійковий вектор  $\bar{D}$  довжиною  $k$  який буде різницевим. В початковому стані приймемо його значення рівним нулю. Будемо в цьому регістрі відмічати зміни інформаційних символів з метою запам'ятовування декодером прийнятого з каналу повідомлення і обчислення в необхідний момент різниці між прийнятим повідомленням і кодовим словом яке розташоване в інформаційному регістрі.

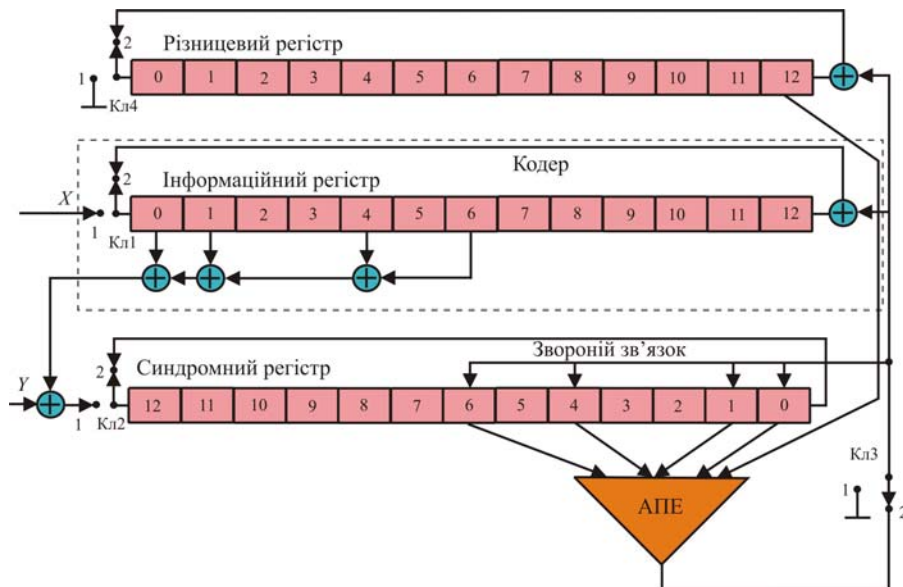


Рис. 1. Схему багатопорогового декодера блокового самоортогонального коду ( $R=1/2$ ,  $d=5$ ,  $n=26$ ): АПЕ – адаптивний пороговий елемент (RLS, LMS)

Алгоритм декодування проводимо шляхом обчислення для довільно взятого символу  $u_j$  функції правдоподібності  $L_j$  яка, загалом, має бути залежна від перевірок  $S_{jk}$  символу та  $j$ -го елемента вектору  $\bar{D}$ :

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{jk} + d_j. \quad (7)$$

Загальна кількість доданків у формулі (7) повинна бути рівна кодовій відстані  $d$ . У випадку коли  $L_j > T$  ( $T = (d-1)/2$  – порогове значення), символ  $u_j$ , перевірки  $\{S_{jk}\}$  і символ  $d_j$  інвертуються і далі

вибирається інший символ  $u_m$  ( $m \neq j$ ). Для цього символу аналогічно обчислюємо суму  $L_m$  і т.д. Якщо  $L_j \leq T$ , то відразу виконуємо перехід до чергового символу  $u_m$ .

Вищеприписана ситуація використовується в класичній схемі багатопорогового декодування [6]. В роботі пропонується встановлювати поріг адаптивно. Основною метою адаптивного кодування є забезпечення необхідної достовірності передачі інформації (ймовірність помилки в прийнятих даних повинна бути не більше заданої) при мінімальній надлишковості завадостійкого коду. Таке кодування дозволяє збільшити швидкість передачі інформації або зменшити займану смугу частот за рахунок адаптації використаного кодера до стану телекомунікаційного каналу. Ідея адаптації полягає в тому, що приймач оцінює відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі і на підставі цієї оцінки вибирає із заданої множини код, який має максимальну кодову швидкість і забезпечує задану достовірність. Слід зазначити, що такий процес безпосередньо пов'язаний із вибором типу цифрової модуляції тобто побудови сигнально-кової конструкції (СКК).

Важливо також зазначити, що запропонований алгоритм багатопорогового декодування дозволяє здійснювати налаштування декодера для мінімізації ймовірності помилки коригуванням в певному діапазоні змін значень порогів  $T_i$ . Причому, значення порогу пропонується проводити адаптивно, а саме на перших ітераціях декодування збільшувати величину порогу. В даному випадку пороговий елемент на перших ітераціях буде вносити меншу кількість власних помилок в повідомлення яке передається наступним ітераціям. Такий підхід, як показали дослідження представлені нижче, дозволяє значно підвищити загальну ефективність схеми декодера. Слід також зазначити, що багатопороговий декодер може модифікуватись для сумування перевірок в (7) з деякими коефіцієнтами. Дану обставину використаємо для моделювання схеми декодера у випадку м'яких рішень, коли додаткові вихідні біти підвищують надійність прийняття рішення. Вираз для обчислення функції правдоподібності  $L_j$  представимо наступним чином:

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{j_k} w_{j_k} + d_j w_j, \tag{8}$$

де  $S_{j_k}$  – коефіцієнти надійності перевірки  $S_{j_k}$ ;  $w_j$  – коефіцієнти надійності прийнятого символу  $u_j$ .

Для порівняння ефективності процесів м'якого та жорсткого декодування представимо результати дослідження імітаційної схеми каналу передачі інформації з адитивним білим гаусівським шумом. Шум оцінюємо гаусівською випадковою величиною з нульовим середнім і дисперсією  $\sigma^2 = 1/(2E_b / N_0)$ , причому ймовірність помилки в каналі від відношення сигнал/шум буде:

$$p = \Phi\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}\right), \text{ і } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt. \tag{9}$$

Джерелом інформаційного потоку використано генератор випадкових чисел Bernoulli Random Binary Generator, згортковий кодер Convolutional Encoder, QPSK-модулятор та демодулятор і декодер Вітербі який може працювати як у «жорсткому», так і у «м'якому» режимі декодування (на рис. 2 показаний варіант схеми у випадку «м'якого» декодування).

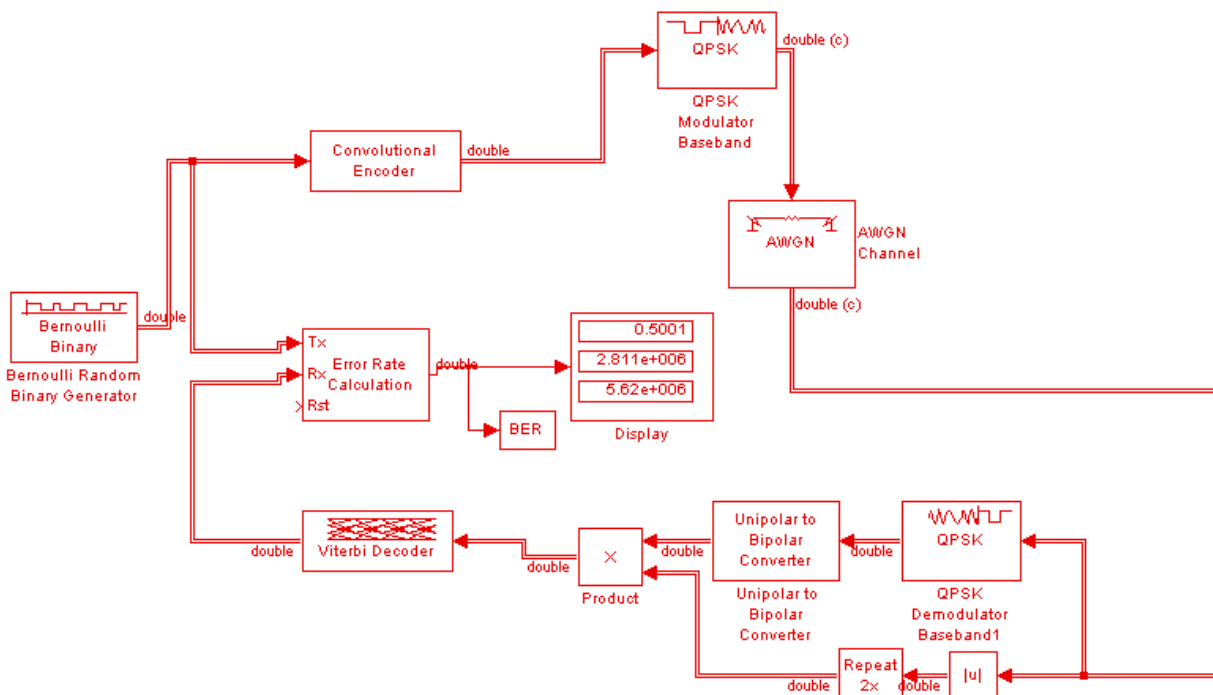


Рис. 2. Імітаційна схема телекомунікаційного каналу з QPSK-модуляцією та згортковим кодуванням

Результати моделювання схеми представлено на рис. 3 у вигляді симуляції залежностей завадостійкості у випадку застосування процедур м'якого та жорсткого декодування по Вітербі за допомогою інструмента Matlab BERTool.

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки: використання "м'якого" декодування згорткових кодів при  $E_b / N_0 = 10^{-2} \dots 10^{-3}$  дає додатковий приріст енергетичного виграшу кодування (ЕВК) до 2 дБ. Найбільш раціональним є введення "м'якого" рішення при декодуванні по алгоритму Вітербі (Soft на рис. 3). Складність декодера зростає при цьому незначним чином. Складність декодерів при введенні м'якого декодування зростає практично в  $\log_2 Q$  разів ( $Q$  — кількість рівнів квантування). Саме тому часто при декодуванні обмежуються компромісним рішенням, використовуючи режим роботи із стираннями ( $Q=4$ ), що дає збільшення ЕВК близько 1 дБ при невеликому ускладненні декодера. В каналах з когерентною фазовою маніпуляцією і неоднозначністю фази доцільне застосування прозорих до неоднозначності кодів. Це дозволяє істотно понизити втрати ЕВК при стрибках фази носійної.

Отриманий результати досить важливий з точки зору розгляду питань, які окреслено для розгляду в статті.

**Визначення ефективності багатопорогових схем декодування блокових та згорткових самоортогональних кодів в телекомунікаційних каналах з фазовою маніпуляцією**

У випадку порогового декодування згорткових кодів помилки виправляються послідовно спочатку в 1-му прийнятому блоці довжиною, наприклад  $n_0$ , далі у другому і т. д. [3, 6]. При цьому коригувальна здатність коду визначаються тим, як виправляються помилки в 1-му блоці, так як після виправлення помилок в 1-му блоці виправлення помилок в наступних блоках здійснюється так само. Отже, при дослідженні порогового декодування згорткових кодів, обмежувались дослідженням впливу структури синдромів і матриці на декодування лише 1-го блоку. Крім того, враховували, що усі самоортогональні коди допускають повну ортогональність, тобто за допомогою мажоритарного декодування можуть бути виправлені всі помилки, виправлення яких гарантується мінімальною кодовою відстанню.

Оцінювання ймовірності помилок багатопорогового декодера проводилось за допомогою наступних виразів:

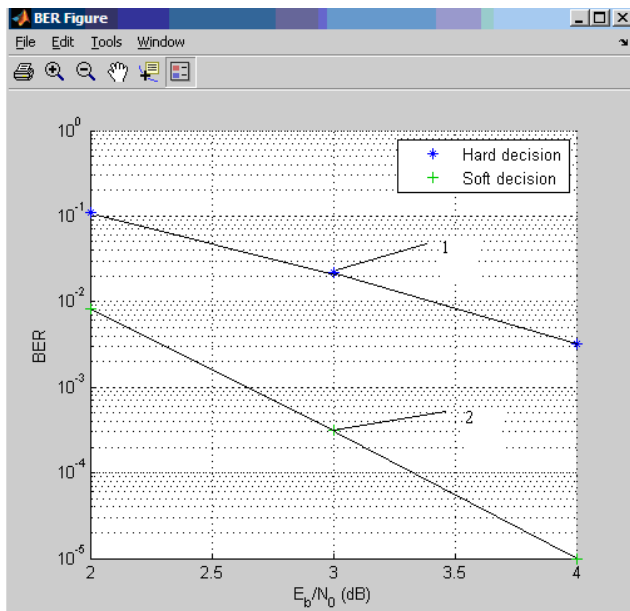
$$p_b = (1-p) \sum_{i=T+1}^J C_J^i P^i (1-P)^{J-i} + p \sum_{i=J-T}^J C_J^i P^i (1-P)^{J-i}. \tag{10}$$

де  $p$  — ймовірність спотворення біту в телекомунікаційному каналі;  $J$  — кількість доданків породжувального поліному ( $J = d - 1$  і  $d$  — кодова відстань);  $P = \frac{1 - (1 - 2p)^{J(n-1)}}{2}$  — ймовірність помилковості перевірки;  $T$  — величина порога на пороговому елементі, яку задавали як  $T = \frac{d-1}{2}$  (для швидкостей  $R = 1/n$  і  $R = (n-1)/n$ ).

У випадку моделювання декодерів які містять зворотній зв'язок, для оцінювання ймовірності помилки на біт  $p_b$  використовували наступні формули:

$$p_b = \begin{cases} \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i}; \\ 0,5 C_d^{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} + \sum_{i=(d/2)+1}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i}; \\ \Phi(\sqrt{2dE_b / N_0}). \end{cases} \tag{11}$$

В системі (11) перші рівняння справедливе для дискретного симетричного каналу при непарному  $d$ , друге — за парних  $d$ , третє для каналу з білим гаусівським шумом. В системі (11)  $d$  — кодова відстань,  $p$  —



**Рис. 3. Залежності завадостійкості системи зв'язку з фазовою маніпуляцією та загортковим кодуванням у випадку декодування по Вітербі, де (1) – жорстке рішення; (2) – м'яке рішення**



ймовірність помилки на виході декодера;  $E_b / N_0$  – відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі;  $\Phi(x)$  – інтеграл ймовірності формула (9).

Для дослідження використані коди з мінімальною кодовою відстанню  $d$ , від 3 до 17. Формували коди із швидкостями 1/2, 2/3, 1/3, 4/6, 4/7, 4/8, 4/9, 4/10, 4/11, 4/12 довжиною до 100000 бітів.

На рис. 4, 5 представлено характеристики багатопорогового декодера у AGWN-каналі при використанні 16-рівневого квантування.

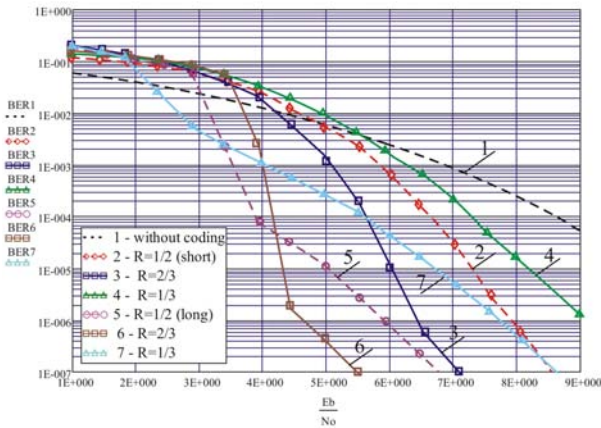


Рис. 4. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера для коротких (short) і довгих (long) блокових кодів в каналі з фазовою маніпуляцією (BPSK, жорстке декодування)

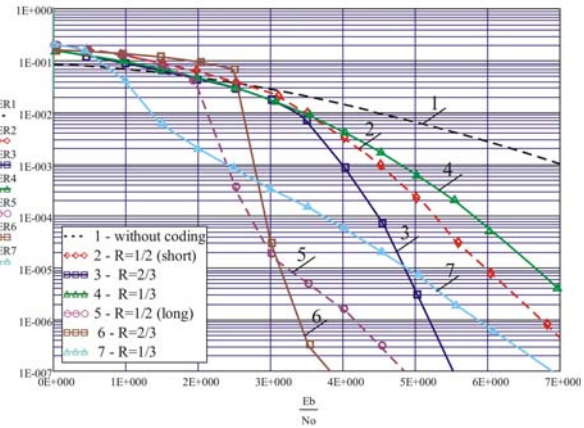


Рис. 5. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера блокових самоортогональних (коротких (short) і довгих (long)) кодів, м'яке рішення, AGWN-канал

З рис. 4 та 5 визначаємо, що використання довгих кодів дозволяє досягти ефективність декодера максимальної правдоподібності, а перехід до “м’яких” рішень демодулятора дозволяє підвищити ЕВК до 2 дБ у порівнянні з “жорсткими” рішеннями.

На рис. 5 та 6 представлено графіки завадостійкості багатопорогового декодера самоортогональних кодів в дискретному симетричному каналі (СКК на основі BPSK) та AGWN-каналі.

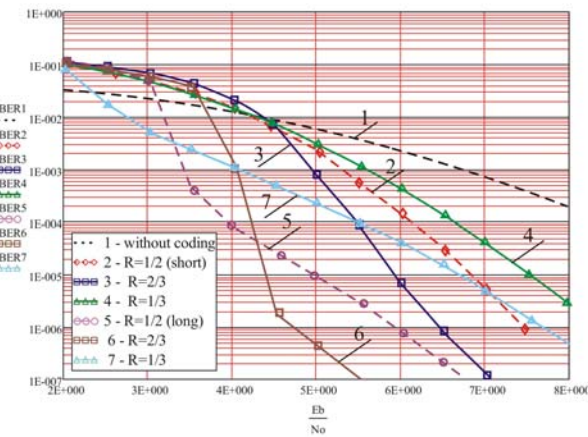


Рис. 6. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера самоортогональних коротких і довгих згорткових кодів для сигнально-кодової конструкції з фазовою маніпуляцією (дискретний-симетричний канал)

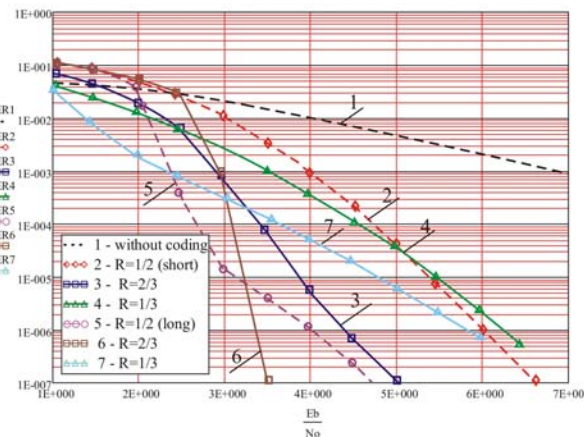


Рис. 7. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера коротких і довгих самоортогональних згорткових кодів у AGWN-каналі

Аналіз отриманих графіків (рис. 6 та рис. 7) дозволяє зробити висновок щодо приблизної рівності ефективності багатопорогових декодерів блокових і згорткових кодів. Отримання результату у підвищенні ефективності може лежати в площині оптимізації порогових елементів та зміни кількості ітерацій при декодуванні. Крім того, отримані результати багатопорогового декодування свідчать щодо переваги таких схем над схемами декодерів Вітербі навіть у випадку високого рівня шуму в телекомунікаційному каналі (рис. 3).

На рис. 8 та рис.9 представлено результати моделювання багатопорогових декодерів в телекомунікаційних каналах з багатопозиційною фазовою маніпуляцією у випадку винесення “жорсткого” рішення демодулятором. В процесі дослідження використовували блокові і згорткові самоортогональні коди із швидкостями 4/5, 7/8 ( $d=9$ ) у випадку використання сигналів типу 16QAM 256QAM (“жорстке” рішення демодулятора). В якості довгих кодів було використано коди з мінімальною ймовірністю розмноження помилок і  $n=500$ , а порівняння проводилось із кодами Ріда-Соломона (РС) які досить поширені у телекомунікаційних системах. Графіки побудовано в координатах, як залежність ймовірності спотворення символу  $P_q$  від середньої ймовірності помилки на символ  $P_s$  після декодування. Для досягнення оптимального рішення багатопороговий декодер здійснював  $5 \div 15$  ітерацій декодування прийнятого повідомлення.

Результати моделювання вказують на те, що багатопороговий декодер забезпечує кращі характеристики у порівнянні з РС-кодами [7, 8]. Як показали дослідження такий результат суттєво проглядається за невеликих значень  $q$ , завдяки більшій довжині  $n$  використаних кодів і достатньо задовільній збіжності рішень багатопорогового декодера до рішень оптимального декодера (на рис. 6–9 оптимальні рішення умовно не показані).

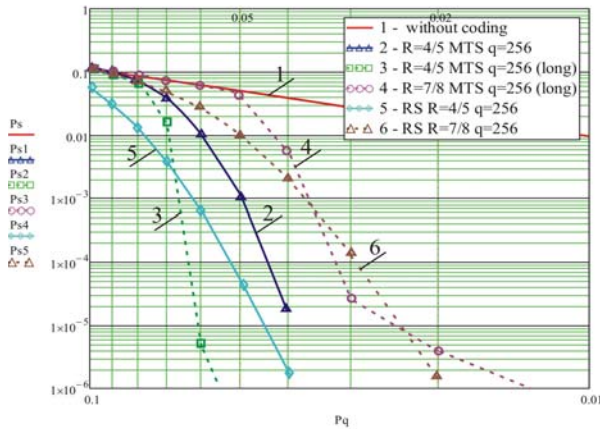


Рис. 8. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера для коротких і довгих блокових самоортогональних кодів:  $q$  – кількість рівнів квантування виходу демодулятора;  $R$  – швидкість кодування (4/5; 7/8); MTS (many threshold schemes) – багатопорогова схема декодування; RS – код Ріда Соломона

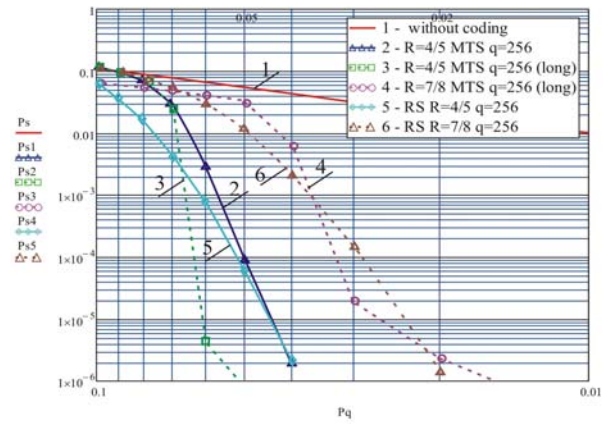


Рис. 9. Графіки завадостійкості багатопорогового декодера для коротких і довгих згорткових самоортогональних кодів:  $q$  – кількість рівнів квантування виходу демодулятора;  $R$  – швидкість кодування (4/5; 7/8); MTS (many threshold schemes) – багатопорогова схема декодування; RS – код Ріда Соломона

На рис. 10 та рис. 11 представлено графіки завадостійкості багатопорогових декодерів за умов застосування алгоритму адаптивного декодування багатопороговим декодером у телекомунікаційному каналі з СКК на основі BPSK і QPSK для забезпечення ймовірності помилки декодування неменше  $10^{-6}$ . Механізм адаптивного декодування загалом ґрунтується на тому, що багатопороговий декодер містить сукупність інформаційних та перевірочних гілок, а отже дозволяє керувати надлишковістю шляхом підключення або виключення перевірочних гілок. Тоді процес адаптації зводили до оцінювання приймачем відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі та адаптивному виборі на основі такої оцінки з певної множини коду, який би володів максимальною кодовою швидкістю і забезпечував задану достовірність. Наявність в каналі значного рівня шуму буде спричиняти необхідність застосування потужного коду з більшою кількістю ітерацій декодування і навпаки, низький рівень шумів буде спричиняти необхідність використання менш потужного коду та меншу кількість ітерацій декодування. Таким чином, запропонований алгоритм дає можливість адаптивно змінювати параметри кодеру та декодера під стан телекомунікаційного каналу враховуючи інтенсивність завад. Для проведення такої адаптації використовували алгоритми адаптації (LMS, RLS, Kalman) з метою визначення відношення сигнал/шум в телекомунікаційному каналі зв'язку.

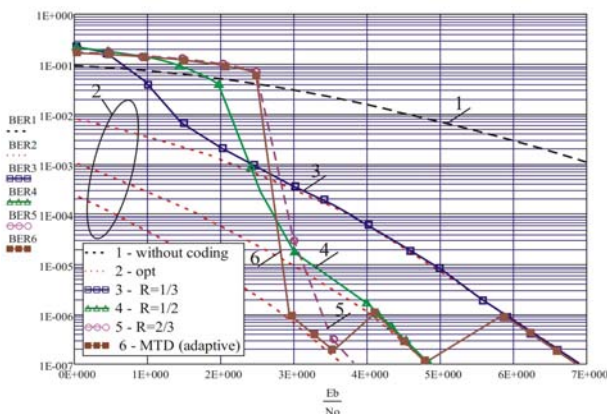


Рис. 10. Характеристики адаптивного багатопорогового декодера в AGWN-каналі для довгих блокових кодів

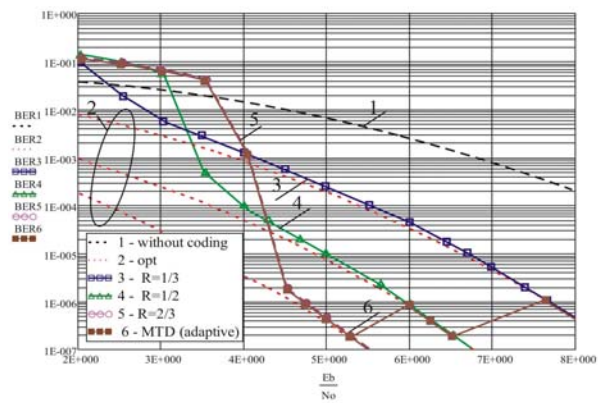


Рис. 11. Характеристики завадостійкості адаптивного багатопорогового декодера (BPSK) для довгих згорткових кодів

Спостерігаємо досить задовільне наближення кривої завадостійкості до кривої оптимального декодера (2-opt).

### Висновки

Дослідження схем декодування самоортогональних кодів дозволило встановити, що в результаті обробки цифрових кодованих потоків даних ймовірний випадок коли в процесі роботи декодера відбулося припинення інформаційних символів, а оптимальне рішення при детектуванні ще не досягнуто. Крім того

внаслідок виникнення проблеми пов'язаної з ефектом розмноження помилок, на наступних ітераціях декодування декодер буде працювати з потоками помилок у вигляді пакетів які виникають від попередніх ітерацій. Дані обставини суттєво впливають на ефективність спрацювання всього декодера. Основним способом зменшення ефекту розмноження помилок є способи пов'язані з застосуванням кодів, які характеризуються малим зменшенням перетинів множин помилок, що входять в перевірку відносно різних інформаційних символів. Інший спосіб, ґрунтується на використанні адаптивного налаштування параметрів декодера, зокрема адаптивного налаштування порогу на різних ступенях ітерацій. Аналіз графіків на рис. 4-9 дозволяє констатувати, що застосування багатопорогового декодера для декодування коротких кодів практично не впливає на підвищення енергетичного виграшу в порівнянні з пороговим декодером [6]. Використання кодів з малим ефектом розмноження помилок та адаптивного декодера забезпечує декодування, яке наближається до оптимального, що дозволило збільшити ЕВК до 2,5 дБ ( $BER=10^{-6}$ ). Крім того, дослідження показали, що багатопороговий декодер за однакової ефективності з турбокодами [7, 9, 10] буде майже в  $10\div 100$  разів швидше.

### Література

1. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с.
2. Моргун О. А. Дослідження особливостей згортального кодування інформації у високошвидкісних системах цифрового зв'язку / О. А. Моргун // Системи обробки інформації. – 2012. – № 5. – С. 42–46.
3. Liu Y. Multi-threshold bit flipping algorithm for decoding structured LDPC codes / Y. Liu, X. Niu, M. Zhang // IEEE Communications Letters. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 127–130.
4. Tashatov N. et al. Multilevel Multithreshold Decoding of Self-Orthogonal Codes for High-Speed Communications / N. Tashatov // Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Trends in Multidisciplinary Academic Research (ITMAR-2015). – 2015. – Т. 2. – С. 187–190.
5. Grinchenko N. Improving performance of multithreshold decoder over binary erasure channel / N. Grinchenko, A. Gromov, G. Ovechkin // Embedded Computing (MECO), 6th Mediterranean Conference on. – IEEE, 2017. – С. 1–4.
6. Zolotaryov V. V. et al. Soft decision decoding techniques in multithreshold decoding of self-orthogonal codes / V. V. Zolotaryov // Digital Signal Processing (DSP), 18th International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 1–4.
7. Бойко Ю. М. Дослідження ефективності алгоритмів канального кодування в захищених телекомунікаційних системах передавання інформації / Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, О. І. Пасічник // Зв'язок : загальногалуз. наук.-вироб. журн. – Київ, 2016. – № 5. – С. 56–67.
8. Boiko J. Signal processing in telecommunications with forward correction of errors / J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 11. – № 3. – С. 868–877.
9. Boiko J. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 4th International. – IEEE, 2017. – С. 173–178.
10. Бойко Ю. М. Дослідження способів завадостійкого кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації / Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, С. В. Івчун // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 2. – С. 188–195.

### References

1. Boiko Yu. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavod : monohrafiia / Yu. M. Boiko, V. A. Druzhynin, S. V. Toliupa. – Kyiv : Lohos, 2018. – 227 s.
2. Morhun O. A. Doslidzhennia osoblyvostei zghortalnoho koduvannia informatsii u vysokoshvydkisnykh systemakh tsyvrovoho zviazku / O. A. Morhun // Systemy obrobky informatsii. – 2012. – № 5. – S. 42–46.
3. Liu Y. Multi-threshold bit flipping algorithm for decoding structured LDPC codes / Y. Liu, X. Niu, M. Zhang // IEEE Communications Letters. – 2015. – Т. 19. – № 2. – S. 127–130.
4. Tashatov N. et al. Multilevel Multithreshold Decoding of Self-Orthogonal Codes for High-Speed Communications / N. Tashatov // Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Trends in Multidisciplinary Academic Research (ITMAR-2015). – 2015. – Т. 2. – S. 187–190.
5. Grinchenko N. Improving performance of multithreshold decoder over binary erasure channel / N. Grinchenko, A. Gromov, G. Ovechkin // Embedded Computing (MECO), 6th Mediterranean Conference on. – IEEE, 2017. – S. 1–4.
6. Zolotaryov V. V. et al. Soft decision decoding techniques in multithreshold decoding of self-orthogonal codes / V. V. Zolotaryov // Digital Signal Processing (DSP), 18th International Conference on. – IEEE, 2013. – S. 1–4.
7. Boiko Yu. M. Doslidzhennia efektyvnosti alhorytmiv kanalnogo koduvannia v zakhyshchennykh telekomunikatsiinykh systemakh peredavannia informatsii / Yu. M. Boiko, D. A. Makaryshkin, O. I. Pasichnyk // Zviazok : zahalnohaluz. nauk.-vyrob. zhurn. – Kyiv, 2016. – № 5. – S. 56–67.
8. Boiko J. Signal processing in telecommunications with forward correction of errors / J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 11. – № 3. – С. 868–877.
9. Boiko J. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 4th International. – IEEE, 2017. – S. 173–178.
10. Boiko Yu. M. Doslidzhennia sposobiv zavadostiikoho koduvannia dlia zakhystu vid pomylrok u tsyfrovyykh kanalakh peredavannia informatsii / Yu. M. Boiko, D. A. Makaryshkin, S. V. Ivchun // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2013. – № 2. – S. 188–195.

Рецензія/Peer review : 9.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Прорецензовано редакційною колегією



## ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДНИХ КОДІВ ТА ТУРБОКОДІВ

В роботі проведений аналіз побудови завадостійких кодів, заснованих на послідовному або паралельному з'єднанні складових кодів. Представлено порівняння ефективності каскадних кодів і турбокодів з відокремленим використанням їх складових. Показано, що кращим характеристикам відповідає каскадне з'єднання декількох складових кодів. Досліджено алгоритм ітеративного декодування турбокодів, ефективність турбокоду у порівнянні зі згортковим. Зроблений висновок, що турбокод ефективніше послідовного каскадного на 2,5 дБ.

Ключові слова: каскадний код, турбокод, завадостійке кодування.

I.S. PYATIN, V.V. MISHAN, D.B. VERSHKOV

Khmelnytskyi National University

## RESEARCH OF CASCADE CODES AND TURBO CODES

To ensure the minimum probability of mistaken reception of information, it is necessary to use interference-encoding. The purpose of the paper is to investigate the efficiency of cascading codes and turbo codes compared to other methods of noise immunity encoding. In this work an analysis of the construction of noise immunity codes based on the sequential or parallel connection of component codes is carried out. The method of implementing cascading codes consists in the sequential connection of two or more codes. The most common is a circuit with two levels of coding. The paper investigates the cascading coding system, where the Reed-Solomon code is used as an external code, and as an internal - convolutional code. The internal code is decoded by the Viterbi decoder, and the external one is the decoder of Reed-Solomon. It is found that cascading code is more efficiently converting at 5 dB at the level of BER =  $10^{-4}$ . The turbo code is found to be 5.5 dB more efficiently. Simulink-model of the communication system with turbo coding and iterative decoding is researched. It is found that the use of five iteration of decoding a posterior probability (APP) turbo code is more effective than another iteration of 1.7 dB for BER =  $10^{-6}$ . The comparison of the efficiency of cascading codes and turbo codes with the separate use of their constituents is presented. It is shown that the cascading connection of several constituent codes corresponds to the best characteristics. The efficiency of turbo code in comparison with conveying is studied. It is concluded that the turbo code is more efficient than the successive cascade at 2.5 dB.

Keywords: concatenated codes, turbo codes, antinoise coding.

## Постановка задачі

Завдяки інтенсивному розвитку цифрових систем зв'язку актуальним завданням може бути досягнення мінімальної ймовірності помилкового приймання інформації. Ефективним способом досягнення цього є застосування завадостійкого кодування. Відповідно до теореми Шенона найкращим кодом є код, який передає повідомлення за нескінченно великий час, формуючи в кожен момент часу випадкові кодові елементи. У приймача є нескінченні версії повідомлення, спотвореного випадковим чином. З цих копій декодер повинен вибрати копію, найбільш близьку до переданого повідомлення. Першим кроком в побудові ефективних кодів було відкриття в 1964 р. каскадних кодів, другим кроком – відкриття в 1993 р. турбокодів [1].

Турбокод – паралельний каскадний або блоковий, або згортковий код, пов'язаний перемешувачем інформаційних символів, здатний виправляти помилки, що виникають при передачі цифрової інформації по каналу зв'язку з шумами (завадами). Турбокоди (ТК) відносять до випадкових кодів. Складові коди називаються компонентними. Під час ітеративного декодування інформація з виходу однієї ітерації надходить на вхід другої ітерації декодування і так далі. Кількість ітерацій декодування залежить від забезпечення заданої достовірності передачі інформації. Для декодування складових кодів зазвичай використовують декодування по максимуму апостеріорної ймовірності (МАР-алгоритм). ТК дозволяють практично наблизитися до так званої межі Шеннона: відхилення становить не більше 0,5 дБ. Завдяки цій властивості ТК знаходять в даний час широке застосування в цифрових системах зв'язку різного призначення і застосування.

## Аналіз досліджень та публікацій

Метод реалізації каскадних кодів полягає у послідовному з'єднанні двох або більше кодів. При застосуванні таких кодів необхідно збільшувати загальну довжину блоку при одночасному зменшенні складності устаткування [1]. Найбільш поширеною є схема з двома рівнями кодування. Одним з кодів, він називається зовнішнім, буває код Ріда-Соломона (РС); а в якості внутрішнього можна вибрати один з багатьох різноманітних кодів. Основний принципи каскадного кодування з двома рівнями показаний на рис. 1 [1].



Рис. 1. Структурна схема системи з каскадним кодуванням

Припустимо, що канал має двійковий вхід. Зовнішнім кодом є недвійковий код, який використовує

$K$ -бітові символи. Ці символи надходять в кодер зовнішнього коду від джерела даних, як показано на рис. 1. Передбачається, що зовнішній код є блоковим і його блок складається з  $n$  символів, причому  $k$  з них є інформаційними. Далі  $K$  – бітові символи, що виходять з кодера зовнішнього коду, кодується кодером внутрішнього коду. При цьому додаються  $N - K$  перевірочних двійкових символів, так що довжина блоку внутрішнього коду дорівнює  $N$ . В канал надходять  $N$ -бітові символи і для можливості здійснення двійкової передачі паралельні символи переводяться в послідовні.

На приймальному кінці можуть використовуватися як жорсткі, так і м'які рішення. У будь-якому випадку результати цих рішень паралельно подаються на декодер внутрішнього коду. Цей декодер дає оцінку кожного  $K$ -бітового символу зовнішнього коду з імовірністю помилки  $p_s$ . Декодер зовнішнього коду має ймовірність помилки двійкового символу  $P_b$ .

Довжина каскадного коду  $N' = nN$  двійкових символів, причому  $K' = kK$  символів кодового слова – інформаційні, і швидкість коду  $R' = rR = kN / nK$ , де  $R = K / N$  і  $r = k / n$ . Хоча загальна довжина коду дорівнює  $nN$ , каскадування забезпечує таку структуру коду, що декодування може здійснюватися за допомогою двох декодерів для кодів з довжинами  $N$  і  $n$  відповідно. Це дозволяє істотно знизити складність в порівнянні з тією, яка була б для отримання тієї ж ймовірності помилки при одному рівні кодування. Краще в якості зовнішніх вибирати коди Ріда - Соломона. Ці коди найбільш широко поширені, оскільки є кодами з максимальною відстанню ( $d = n - k + 1$ ) і відносно просто реалізуються. Нехай система використовує зовнішній код Ріда - Соломона з декодуванням лише при наявності помилок. Це означає, що декодер внутрішнього коду в якості рішень видаватиме лише символи, не вказуючи ані стирань ані достовірності кожного символу. Найбільш перспективним є використання згорткового кодування з малою довжиною кодового обмеження і алгоритмом декодування Вітербі (з м'якими рішеннями демодулятора).

Розглянемо систему, внутрішнім кодом якої є згортковий код.  $K$ -бітові символи, що надходять із зовнішнього кодера, повинні бути знову переведені в послідовні для того, щоб можна було здійснити згорткове кодування. Однак при цьому слід зберігати блокову синхронізацію, тобто збіг початку блоку зовнішнього коду і кожного символу коду РС. Після декодування алгоритмом Вітербі, декодовані дані знову повинні бути переведені у  $K$ -бітові символи, що надходять на вхід декодера РС. Помилки на виході декодера Вітербі групуються у пакети, тому помилки в послідовних символах коду РС будуть некорельованими. Оскільки кореляція може викликати погіршення параметрів декодера Вітербі, слід застосувати перемешування. Це перемешування має бути таким, щоб ніякі два символи на виході декодера Вітербі, відстань між якими менше глибини декодування, не належали до одного кодового слова коду Ріда-Соломона.

Для визначення ймовірності помилки двійкового символу на виході декодера РС слід застосувати вираз ймовірності помилки двійкового символу на виході декодера Ріда-Соломона:

$$P_b < \frac{2^{K-1}}{2^K - 1} \sum_{j=t+1}^n \frac{j+t}{n} C_n^j p_s^j (1-p_s)^{n-j}, \quad (1)$$

де  $p_s$  – ймовірність помилки символу на вході декодера Ріда-Соломона,  $t$  – кількість помилок символів, що виправляє код Ріда-Соломона.

При цьому передбачається ідеальне перемешування, так що помилки символів на вході декодера РС вважаються незалежними. При кодах з  $R = 1/3$  вираш від кодування збільшується приблизно на 0,6 дБ в порівнянні з кодами з  $R = 1/2$ , в той час як при кодах з  $R = 3/4$  вираш зменшується приблизно на 1,2 дБ.

В наведених публікаціях дослідженню Simulink-моделей каскадних кодів і турбокодів та визначенню їх ефективності приділено недостатню увагу. Мета статті полягає у дослідженні ефективності каскадних кодів і турбокодів у порівнянні з іншими способами завадостійкого кодування

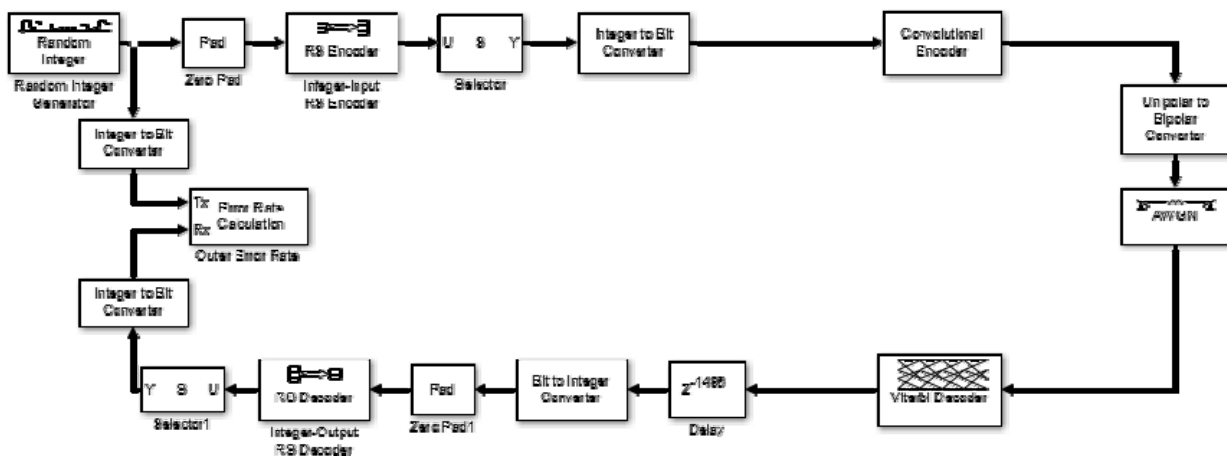


Рис. 2. Simulink-модель системи зв'язку з послідовним каскадним кодуванням

### Дослідження ефективності каскадних кодів

Порівнюємо за енергетичним критерієм системи зв'язку з каскадним коруванням і згортковим кодуванням. Simulink-модель системи зв'язку з послідовним каскадним кодуванням приведена на рис. 2. В якості джерела вхідного сигналу використаний Random Integer generator, що генерує рівномірно розподілені числа в діапазоні  $[0, M-1]$ , де  $M$  задається параметром Set size.

На рис. 3 зображено вікно налаштувань параметрів блоку Zero Pad.

Блок Pad розширює або звужує розміри сигналу на вході шляхом заповнення або вилучення даних за його стовпцями або рядками, або будь-якими зазначеними параметрами. Вилучення даних відбувається, коли ви вкажете розміри сигналу на виході, які коротше, ніж відповідні розміри сигналу на вході. Ви можете ввести значення блоку Pad в масці блоку або через вхідний порт.

Pad over – вказуються розміри, які необхідно розширити або звужити.

Dimensions to pad – вказується масив, елементи якого треба розширити або звужити.

Pad value source – вказується джерело значень блоку Pad.

Pad value – вказуються значення блоку Pad.

Коди Ріда-Соломона – це недвійкові циклічні коди, символи яких  $m$ -бітові послідовності, де  $m$  – додатне ціле число, більше 1. Коди Ріда-Соломона ефективні при виправленні пакетів помилок в каналах з пам'яттю, а також в каналах з великим набором вхідних символів. Особливістю кодів Ріда-Соломона є те, що до коду довжиною  $n$  можна додати два інформаційних символи, не зменшуючи мінімальної відстані. Такий розширений код має довжину  $n + 2$  і ту же кількість символів контролю парності, що і початковий код. Simulink-модель системи зв'язку з згортковим кодуванням зображена на рис. 4.

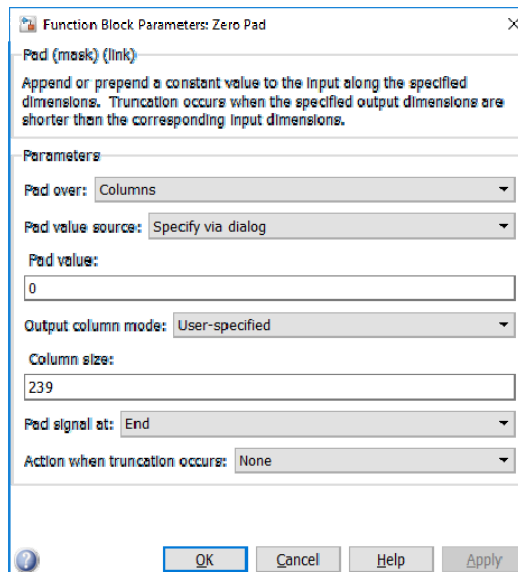


Рис. 3. Налаштування параметрів блоку Zero Pad

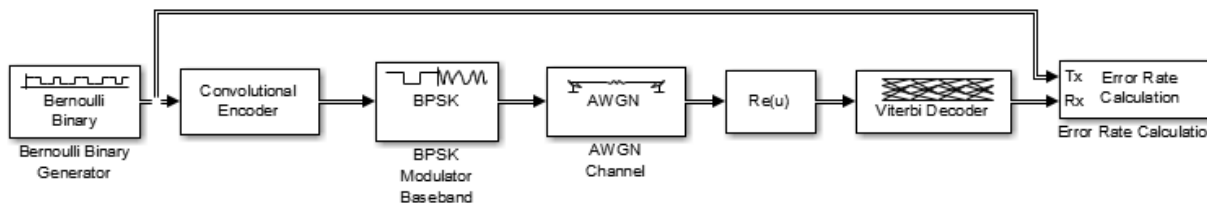


Рис. 4. Simulink-модель системи зв'язку з згортковим кодуванням

Згортковий код – це код, що виправляє помилки і використовує безперервну або послідовну обробку інформації короткими фрагментами (блоками). Згортковий кодер має пам'ять в тому сенсі, що символи на його виході залежать не тільки від (чергового фрагмента) інформаційних символів на вході, а й попередніх символів на його вході. Іншими словами, кодер представляє собою послідовну машину або автомат з кінцевим числом станів. Стан кодера визначається вмістом його пам'яті.

Згортковий кодер представляє собою пристрій, що приймає за кожний такт роботи в загальному випадку  $k$  вхідних інформаційних символів і видає на вихід за той же такт  $n$  вихідних символів, що підлягають передачі по каналу зв'язку. Параметром згорткового коду, що характеризує його завадостійкість, є мінімальна вільна відстань -  $d_c$ , яка визначається як мінімальна відстань за Хемінгом між послідовностями згорткового коду на довжині кодових обмежень по виходу. Кодове обмеження щодо виходу – це число символів на виході кодера, в формуванні яких бере участь один вхідний біт. Ефективність згорткового коду визначається тим, яким чином пов'язані суматори з комірками регістра зсуву [2].

Відношення  $R = k/n$  називають відносною швидкістю коду. Вихідні символи, що створюються кодером на даному такті, залежать від  $k$  інформаційних символів, що надійшли на цьому і попередньому тактах. Вихідні символи згорткового кодера однозначно визначаються його вхідним сигналом і станом, що залежать від  $m - k$  попередніх інформаційних символів. На рис. 5 наведені залежності ймовірності помилки на біт від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму для каскадного коду і згорткового коду.

Основними елементами згорткового кодера є: регістр зсуву, суматори за модулем 2 і комутатор.

Якщо зафіксувати  $BER=10^{-4}$ , то каскадний код ефективніше згорткового на 5 дБ. Проведені також дослідження ефективності турбокоду. На рис. 6 наведені залежності ймовірності помилки на біт від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для турбокоду (turbo) і згорткового коду (conv), за якими можна зробити висновок, що турбокод ефективніше згорткового на 5,5 дБ.

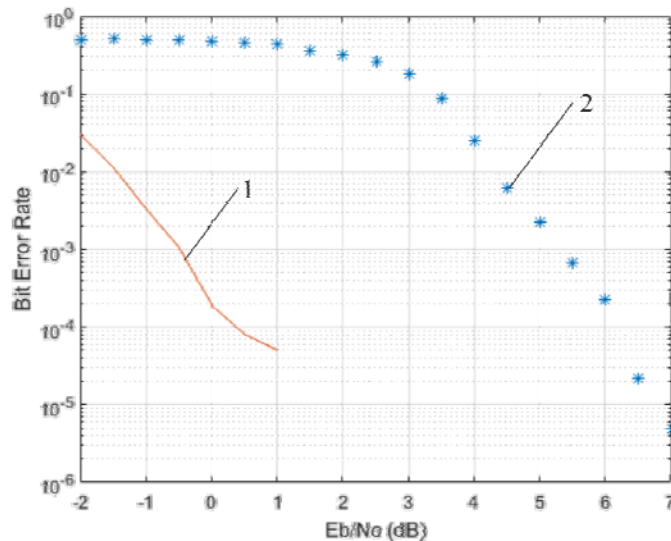


Рис. 5. Залежності ймовірності помилки на біт (BER) від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ): 1) каскадний код; 2) згортковий код

**Дослідження ефективності турбокодів**

Широке розповсюдження отримали паралельні каскадні згорткові турбокоди (ТК). Для побудови турбокодів використовують паралельне об'єднання рекурсивних систематичних згорткових кодів з перемешуванням і ітеративне декодування з м'яким входом і виходом.

Турбокодер – це схема паралельної конкатенації з декількома складовими конверторного коду. Перший кодер працює з використанням вхідної бітової послідовності, в той час як інші працюють з вхідними послідовностями, що отримані шляхом чергування вхідних бітів по довжині блоку. На рис. 6 наведені залежності ймовірності помилки на біт (BER) від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для турбокоду і згорткового коду. Блок Turbo Encoder використовує два ідентичних рекурсивних систематичних згорткових кодера з 8 станами. Об'єкт comm.ConvolutionalEncoder System використовує параметр «Завершення» для властивості TerminationMethod. Це відновлює коди до початкового стану всіх нулів для кожного кадру даних, який обробляє блок. Внутрішній блокувий перемешувач використовує попередньо обчислені індекси перестановок на основі заданого користувачем параметра довжини блоку коду. Підсистема перевпорядкування біт видаляє додатковий набір систематичних бітів з другого виходу енкодера і реалізує закінчення решітки. Залежність ймовірності помилки на біт від відношення  $E_b/N_0$  для різної кількості ітерацій турбокоду приведена на рис. 7.

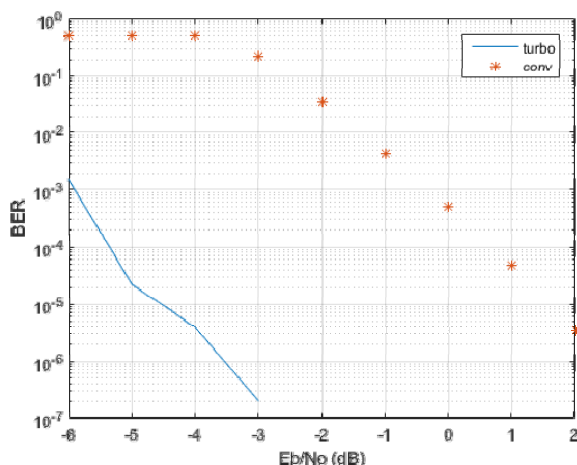


Рис. 6. Залежності ймовірності помилки на біт (BER) від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для турбокоду і згорткового коду

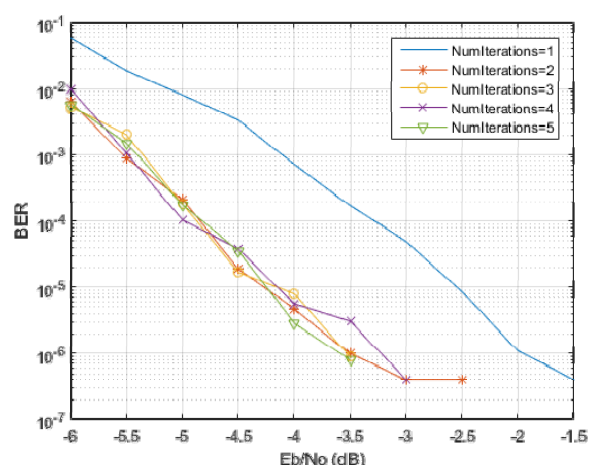


Рис. 7. Залежності ймовірності помилки на біт (BER) від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для різної кількості ітерацій турбокоду

Використання п'яти ітерацій декодування апостеріорної ймовірності (APP) турбокоду ефективніше однієї ітерації на 1,7 дБ для  $BER=10^{-6}$ .

Канал AWGN додає білий гауссовський шум до сигналу, який проходить через нього. Відносна потужність шуму в каналі AWGN описується такими величинами:

- Відношення сигнал / шум (SNR). Це фактичний вхідний параметр функції awgn.
- Співвідношення енергії біта і спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ). Ця величина використовується BERTool і функціями оцінки продуктивності в цьому наборі інструментів.
- Співвідношення спектральної густини потужності енергії символу і енергії шуму ( $E_s/N_0$ ).

Енергія біта дорівнює потужності сигналу  $S$ , помноженої на час передачі біта інформації  $T_b$ .  $N_0$  – спектральна густина потужності шуму, що визначається відношенням потужності шуму  $N$  до смуги  $W$ .

Відношення сигнал-шум для цифрових систем визначається виразом:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S \cdot T_b}{N / W} s$$

Оскільки час передачі біта і швидкість передачі біта обернено пропорційні величини, то  $T_b$  можна замінити на  $1/R$ , де  $R$  – бітова швидкість, в результаті отримуємо:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S \cdot W_b}{N \cdot R}$$

Перемежувач являє собою пристрій, який змішує символи з кількох кодових слів так, що символи з будь-якого кодового слова дають випадковий ефект. Коли деперемежувач реконструює кодове слово, відновивши прийняту послідовність в її первісному вигляді, пакети помилок, що вносяться каналом виявляються розбиті і розкидані по кільком кодовим словам. Перемежувачі використовуються для того, щоб зменшити число кодових слів з малими відстанями в спектрі відстані коду, тобто генерує менше кодових слів з мінімальною відстанню Хеммінга.

Операції перемежовування / депережовування (interleaving / deinterleaving) означають перестановку символів в потоці даних. Ці операції широко застосовуються в системах зв'язку в тих випадках, коли помилки в каналі передачі виникають пакетами, тобто спотворюється велика кількість послідовних символів. Це характерно, скажімо, при завмираннях сигналу в радіоканалі або при наявності подряпин на компакт-диску. Перемежовування дозволяє перетворити пакетні помилки в одиночні, полегшивши тим самим завдання виправлення помилок блокам завадостійкого кодування / декодування.

В блоковому перемежувачі біти з виходу кодера записуються у вигляді двовимірної матриці в певному порядку. Найпростіший спосіб – записати біти у вигляді послідовних рядків. Після заповнення всієї матриці вхідними бітами починається етап зчитування. При цьому біти зчитуються в порядку, відмінному від порядку запису. Зчитування проводиться по стовпцях. В приймачі вхідні біти зберігаються в такій самій двовимірній матриці в тому ж порядку, в якому вони були зчитані в передавачі. Після заповненні матриці прийнятими бітами вони зчитуються в тому ж порядку, в якому були записані в матрицю перемежувача. Запис по рядках і зчитування по стовпцях — найпростіший спосіб розсіювання пакетів помилок. Можна визначити іншу послідовність запису і зчитування в перемежувачі і депережувачі. Обидва процеси повинні бути комплементарні один одному. Послідовність адрес і розмір матриці, що визначає так звану глибину перемежовування, повинні бути підібрані так, щоб пакетні помилки, які виникають в каналі після розсіювання виглядали випадковими. Для коректної роботи перемежувача і депережувача необхідна синхронізація. Якщо часові рамки зчитування передавача і приймача будуть зсунуті один відносно іншого, порядок бітів на виході з депережувача не дасть правильних результатів. Тому, послідовність, яка передається часто починається з короткого синхронізуючого слова. В момент часу коли одна з них використовується для зберігання вхідних даних, інша використовується для зчитування даних, записаних раніше. Після завершення операцій запису/зчитування змінюється функція матриць. Здатність розсіювати пакетні помилки визначається глибиною перемежовування. Тобто необхідно збільшувати розміри матриці, щоб ефективно боротися з пакетними помилками. Збільшення розмірів матриці приведе до використання більшого об'єму пам'яті та зростання вимоги щодо синхронізації передачі. Цікавим є питання використання матриць змінного розміру та пошуку алгоритмів запису/зчитування біт в матрицю.

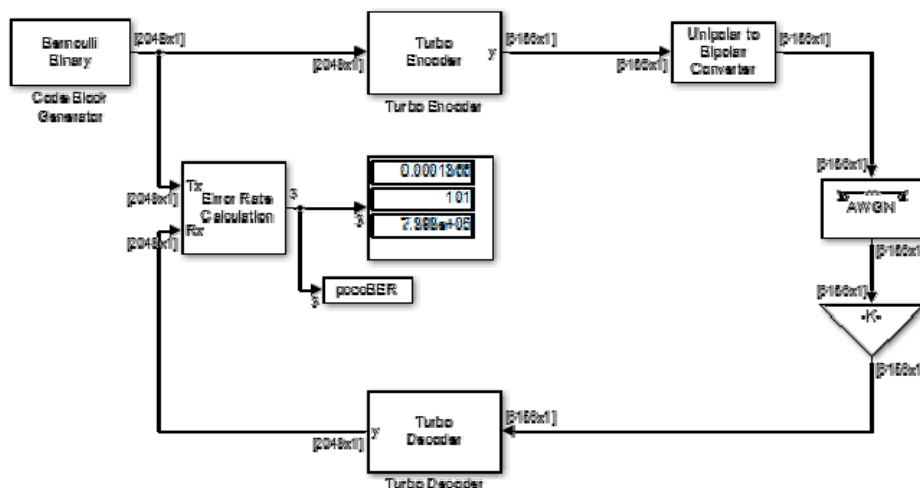


Рис. 8. Simulink-модель системи зв'язку з турбокодуванням

На рис. 8 приведена Simulink-модель системи зв'язку з турбокодуванням. В якості джерела вхідних



даних використано Bernoulli Binary Generator, що генерує випадкові двійкові числа, використовуючи розподіл Бернуллі. Розподіл Бернуллі з параметром  $p$  дає нуль з імовірністю  $p$  і один з імовірністю  $1-p$ . Розподіл Бернуллі має середнє значення  $1-p$  і дисперсію  $p(1-p)$ . Імовірність нульового параметра вказує  $p$ , і може бути будь-яке дійсне число між нулем і одиницею.

На рис. 9 приведена Simulink-модель системи зв'язку з послідовним каскадним кодуванням. Виконано порівняння ефективності послідовного каскадного коду і турбо-коду. Послідовний каскадний код складається з зовнішнього згорткового кодера, перемежувача і внутрішнього згорткового кодера. Декодер каскадного коду побудований за методом максимуму апостеріорної ймовірності.

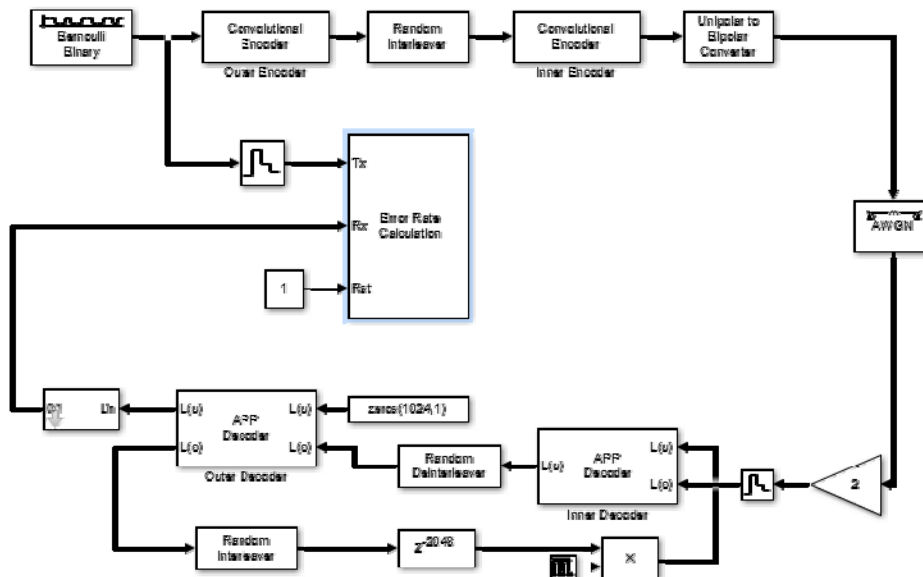


Рис. 9. Simulink-модель системи зв'язку з послідовним каскадним кодуванням

На рис. 10 наведені залежності ймовірності помилки на біт від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для каскадного коду і турбокоду.

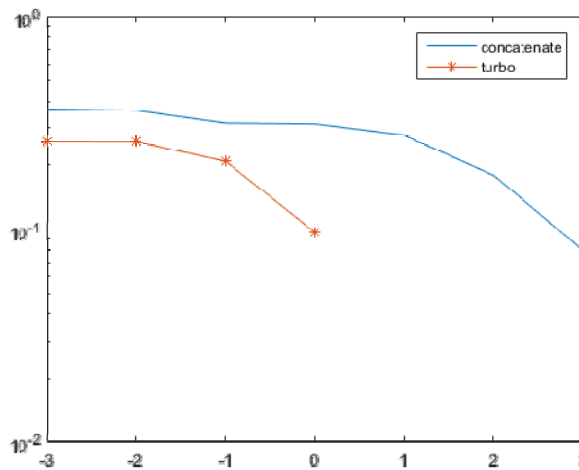


Рис. 10. Залежності ймовірності помилки на біт (BER) від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму ( $E_b/N_0$ ) для каскадного коду і турбокоду

З отриманого графіка залежності ймовірності помилки (BER) від відношення сигнал-шум можна зробити висновок, що турбокод ефективніше послідовного каскадного на 2,5 дБ.

Для ітеративного декодування схеми паралельного кодування Turbo Decoder використовує декодер апостеріорної ймовірності (APP) в якості складового компонента декодера. Кожен системний об'єкт comm.APPDecoder відповідає кодеру, який забезпечує оновлену послідовність значень логарифмічної правдоподібності для некованих бітів з прийнятою послідовністю за допомогою логарифмічних правдоподібностей для бітів кодованого каналу. Для кожного набору прийнятих послідовностей каналу декодер ітеративно оновлює логарифмічні ймовірності для некованих бітів до тих пір, поки не буде виконано критерій зупинки. У цьому прикладі використовується фіксована кількість ітерацій декодування, як зазначено в параметрі Кількість ітерацій декодування в блоці параметрів моделі. Число ітерацій за замовчуванням шість.

Властивість Termination Method для системного об'єкта декодера APP встановлено як «Terminated»

для відповідності кодеру. Внутрішній перемежувач декодера ідентичний внутрішньому перемежувачу, що використовує кодер. Він переупорядковує послідовності так, щоб вони були правильно вирівняні в двох декодерах.

### Висновки

Турбокоди дозволяють практично наблизитися до межі Шеннона: відхилення становить не більше 0,5 дБ. Досліджено каскадний код з двома рівнями кодування. Один з кодів (зовнішній), є кодом Ріда-Соломона; а в якості внутрішнього – обраний згортковий код. Якщо зафіксувати  $BER=10^{-4}$ , то каскадний код ефективніше згорткового на 5 дБ. Досліджена ефективність турбокоду, що представляє собою паралельний каскадний або блоковий, або згортковий код, пов'язаний перемежувачем інформаційних символів. Турбокод ефективніше послідовного каскадного на 2,5 дБ. Досліджена залежність ймовірності помилки на біт від відношення  $E_b/N_0$  для різної кількості ітерацій турбокоду. Послідовний каскадний код складається з зовнішнього згорткового кодера, перемежувача і внутрішнього згорткового кодера.

### Література

1. Кларк Д. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Д. Кларк, Д. Кейн ; [пер. с англ.]. – М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.
2. Пятін І. С. Дослідження послідовного каскадного турбокодування / І. С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 142–145.
3. Пятін І.С. Моделювання цифрової системи зв'язку з завадостійким кодуванням / І.С. Пятін, В.В. Сергеев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 6. – С. 89–91.

### References

1. Klark D. Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemah tsifrovoy svyazi / D. Klark, D. Keyn. Per. s angl. – M.: Radio i sviaz, 1987. – 392 s.
2. Pyatin I.S. Doslidzhenia poslidovnoho kaskadnoho turbokoduvannia / I.S. Pyatin, D.A. Makaryshkin // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Issue 3. – С. 142-145.
3. Pyatin I.S. Modeliyvannia tsifrovoy sistemy zviazku z zavadostiykym koduvanniam / I.S. Pyatin, V.V. Sergeev // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Issue 6. – С. 89-91.

Рецензія/Peer review : 6.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

## ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ СЕМАНТИЧНОЇ СТРУКТУРИ НАВЧАЛЬНОГО КУРСУ

В статті розглянуто інформаційну модель семантичної структури навчального курсу. Інформаційна модель семантичної структури навчального курсу є формальним поданням інформаційного та тестового навчальних матеріалів навчального курсу дисципліни. Формалізація моделі проводиться шляхом подання частини елементів навчального курсу як множини сутностей. До таких елементів навчального курсу належать заголовки, слова, ключові терміни, тестові завдання та зв'язки. Формальне подання семантичної структури курсу навчальної дисципліни у запропонованому вигляді дозволяє використовувати її як модель для відображення семантичної структури прикладних інформаційних навчальних матеріалів та тестових навчальних матеріалів. До складу формального подання семантичної структури таких інформаційних навчальних матеріалів входять множина заголовків, множина термінів, множина слів та множина зв'язків. До множини зв'язків входять такі елементи семантичної структури інформаційних навчальних матеріалів та тестових навчальних матеріалів, які визначають наявність та характер зв'язку між іншими елементами семантичної структури навчального курсу. Зокрема, множини зв'язків належать зв'язки між заголовками, зв'язки між заголовками й ключовими термінами, зв'язки між ключовими термінами та словами, зв'язки між ключовими термінами та тестовими завданнями. Наповнення множин, які входять до складу моделі, надає можливість використання її для розв'язання прикладних задач. З метою наповнення множин моделі семантичної структури курсу навчальної дисципліни пропонується використання ряду відповідних методів. Подання семантичної структури курсу навчальної дисципліни у запропонованому вигляді визначає область прикладних задач, що можуть бути розв'язані з її використанням. Інформаційна модель семантичної структури навчального курсу може бути використана в ході реалізації відповідних прикладних програмних систем. Використання розробленої моделі дозволяє проводити автоматизоване створення наборів тестових завдань. При цьому забезпечується максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу.

Ключові слова: тести, тестування, тестові завдання, навчальні матеріали, ключові терміни.

O. BARMAK, O. MAZURETS  
Khmelnitskyi National University

### INFORMATION MODEL OF THE SEMANTIC STRUCTURE OF THE EDUCATIONAL COURSE

The article considers the information model of the semantic structure of the education course. The informational model of the semantic structure of the education course is a formal representation of the information and test educational materials of the course of the discipline. Formalization of the model is carried out by presenting part of the elements of the education course as a set of entities. There elements of the training course are headings, words, key terms, test tasks and relations. The formal representation of the semantic structure of the education course in the proposed form allows it to be used as a model for mapping the semantic structure of the informational education material and the test education material. The formal representation of the semantic structure of informational education materials includes a set of headings, a set of terms, a set of words and a set of relations. The set of relations includes such elements of the semantic structure of the education course that determine the presence and character of the relations between other elements of the semantic structure of the education course. In particular, the set of relations include relations between headings, relations between headings and key terms, relations between key terms and words, relations between key terms and test tasks. The filling of the sets which are part of the model, provides the ability to use it to solve practical problems. In order to fill the sets of the model of the semantic structure of the course of the discipline, it is proposed to use a number of appropriate methods. The presentation of the semantic structure of the course of the education discipline in the proposed form defines a field of practical problems that can be solved with its use. The informational model of the semantic structure of the education course can be used in the implementation of relevant application software systems. The use of the developed model allows automated creation of sets of test tasks. The use of the developed model the maximum uniformity and wide coverage with a set of test tasks of the semantics of the educational material is provided.

Keywords: tests, testing, test tasks, educational materials, key terms.

### Постановка проблеми в загальному вигляді

Одним із основних способів контролю знань в навчальних інформаційних системах є комп'ютерне тестування. Тест включає в себе набір тестових завдань різної складності, що робить результат тестування більш об'єктивним. При якісному конструюванні тесту можна забезпечити відповідний рівень дискримінативності.

В більшості випадків метою тестування є визначення рівня засвоєння відповідних інформаційних навчальних матеріалів. Інформаційні навчальні матеріали у вигляді слабоструктурованих цифрових документів визначеної структури як інструмент навчання й тести як інструмент контролю рівня отриманих знань формують курси навчальних дисциплін [1].

В умовах вузької спеціалізації курсів навчальних дисциплін, їх чисельності та інтенсивного оновлення, єдиним шляхом забезпечення курсів навчальних дисциплін репрезентативним та дискримінативним тестовим діагностичним матеріалом є автоматизація формування наборів тестових завдань.

### Аналіз останніх досліджень

Різноманітним аспектам тестування, розробки та застосування навчальних і тестувальних середовищ на основі сучасних інформаційних технологій, питанням розробки баз даних і знань програмних



систем перевірки рівня знань присвячені численні праці українських і закордонних авторів: Аванесова В. С., Снитюка В. Е., Титенка С. В., Пасічника В. В., Тонкононого В. М., Башмакова І. А., Клайна П., Гагаріна О. О., Schwarz, Weber [2]. Більшість із них здійснювали дослідження в сфері проведення тестувань, наповнення бази тестових завдань за допомогою засобів підтримки ручного створення тестових завдань, безпеки процесу тестування і відтворення результатів [3]. Рішень, які дозволяють забезпечити автоматизацію формування тестів на належному рівні, наразі не знайдено, що визначає актуальність цього напрямку вишукувань.

Пропонується вирішення проблеми шляхом автоматизованого формування наборів тестових завдань за допомогою системи правил, на основі інформаційної моделі, одержаної в результаті структурного та семантичного аналізу контенту інформаційних навчальних матеріалів.

У попередніх публікаціях авторами було розглянуто ряд аспектів автоматизації формування наборів тестових завдань. Запропоновано підходи до програмного аналізу структури інформаційних навчальних матеріалів [4], до формування моделі структури інформаційних навчальних матеріалів [5]. Визначено переваги використання алгоритму, що базується на дисперсійному аналізі електронних текстів [6, 7], для оцінки семантичної важливості слів у контенті інформаційних навчальних матеріалів [8]. Розроблено метод автоматизованого формування сортованих множин ключових термінів інформаційних навчальних матеріалів [9, 10]. Запропоновано підхід до формування наборів тестових завдань за допомогою системи правил перетворення текстового контенту інформаційних навчальних матеріалів [11].

Інформаційна модель семантичної структури навчального курсу є формальним поданням інформаційного та тестового навчальних матеріалів навчального курсу дисципліни. Її використання надає можливості для автоматизованого формування наборів тестових завдань із застосуванням наведених вище наробок.

### Постановка задачі

Метою роботи є розробка інформаційної моделі семантичної структури навчального курсу. Використання такої моделі при реалізації відповідних прикладних програмних систем дозволить проводити автоматизоване формування наборів тестових завдань, забезпечуючи максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу.

### Викладення основних матеріалів дослідження

Інформаційний навчальний матеріал (ІНМ) в більшості випадків формується у вигляді підручника, навчального посібника чи конспекту лекцій, і є основним носієм інформації в навчальному курсі, призначеної для набуття знань та частини вмінь суб'єктом, що вивчає навчальний курс. Тестовий навчальний матеріал (ТНМ) є найбільш розповсюдженим різновидом діагностуючого навчального матеріалу й призначений для визначення рівня засвоєння ІНМ шляхом використання комп'ютерного чи паперового тестування суб'єкта, що вивчає навчальний курс [1].

Для досягнення поставленої в дослідженні мети, курс навчальної дисципліни (educational course, *EC*) подається у вигляді:

$$(IEM, TEM) \subset EC, \quad (1)$$

де *IEM* – інформаційний навчальний матеріал (informational education material), *TEM* – тестовий навчальний матеріал (testing education material).

Семантична структура інформаційного навчального матеріалу (*IEM*) може бути надана у вигляді:

$$(M_{Heading} \cup M_{Term} \cup M_{Word} \cup M_{Rel}) \subset IEM \subset EC, \quad (2)$$

де *M<sub>Heading</sub>* – множина заголовків, *M<sub>Term</sub>* – множина термінів, *M<sub>Word</sub>* – множина слів, *M<sub>Rel</sub>* – множина зв'язків.

Семантична структура тестового навчального матеріалу (*TEM*) може бути надана у вигляді:

$$(M_{Term} \cup M_{TestEx} \cup M_{Rel}) \subset TEM \subset EC, \quad (3)$$

де *M<sub>Term</sub>* – множина ключових термінів, *M<sub>TestEx</sub>* – множина тестових завдань, *M<sub>Rel</sub>* – множина зв'язків.

Із (1), (2) та (3) випливає наступний вигляд моделі семантичної структури навчального курсу:

$$(M_{Heading} \cup M_{Term} \cup M_{Word} \cup M_{TestEx} \cup M_{Rel}) \subset EC. \quad (4)$$

Далі розглянуто окремі складові розглянутих множин: множину заголовків *M<sub>Heading</sub>*, множину термінів *M<sub>Term</sub>*, множину слів *M<sub>Word</sub>*, множину тестових завдань *M<sub>TestEx</sub>* та множину зв'язків *M<sub>Rel</sub>*.

Зважаючи на існуючі загальноприйняті вимоги до структури інформаційного навчального матеріалу курсу (наприклад: Назва дисципліни / Розділ / Тема), визначено відповідність системи заголовків фрагментів контенту інформаційного навчального матеріалу ієрархічній моделі. Таким чином, кожен елемент множини заголовків *M<sub>Heading</sub>* є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Heading} = (ID, Name, Grade), \quad (5)$$

де атрибут *ID* – унікальний ідентифікатор елемента ( $M_{ID} \in Z$ ), *Name* – назва заголовку, атрибут *Grade* – рівень заголовку в ієрархічній структурі.

Ключові терміни є семантично значущими назвами понять, розуміння яких є обов'язковим для ефективного засвоєння контенту певного фрагменту ІНМ, одержання відповідних знань і вмінь. На відміну від слів, терміни є семантично цілісними виразами. Кожен елемент множини термінів *M<sub>Term</sub>* є кортежем

наступного вигляду:

$$M_{Term} = (TermName, TermNum, TermLem), \tag{6}$$

де  $TermName$  – символна назва терміну,  $TermNum$  – кількість слів у терміні ( $M_{TermNum} \in Z$ ),  $TermLem$  – булевий показник лематизації.

Множина слів  $M_{Word}$  формується шляхом включення до неї всіх елементів, що відповідають присутнім в тексті унікальним словам. Кожен елемент множини слів  $M_{Word}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Word} = (WordName, WordNorm, WordPart, WordLem), \tag{7}$$

де  $WordName$  – символна назва слова,  $WordNorm$  – символна назва слова в нормалізованому вигляді;  $WordPart$  – частина мови, до якої відноситься слово,  $WordLem$  – булевий показник лематизації ( $M_{WordLem} = \{0, 1\}$ ).

До множини тестових завдань  $M_{TestEx}$  належать всі тестові завдання визначеного тесту. Кожен елемент множини тестових завдань  $M_{TestEx}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{TestEx} = (Type, Answers, Points, Model), \tag{8}$$

де  $Type$  – тип питання,  $Answers$  – кількість правильних відповідей ( $Answers \in Z$ );  $Points$  – бал за замовчуванням,  $Model$  – модель, за якою сформоване тестове завдання.

До множини зв'язків  $M_{Rel}$  входять елементи семантичної структури ІНМ та ТНМ, що визначають наявність і характер зв'язку між іншими елементами семантичної структури, зокрема елементами множин  $M_{Heading}$ ,  $M_{Term}$ ,  $M_{Word}$  та  $M_{TestEx}$ . До множини зв'язків  $M_{Rel}$  входять елементи, які визначають бінарні однаправлені зв'язки між двома елементами з множин  $M_{Heading}$ ,  $M_{Term}$ ,  $M_{Word}$  та  $M_{TestEx}$ . Відповідно, кожен елемент множини зв'язків є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Rel} = (TypeRel, Obj1, Obj2, Feature), \tag{9}$$

де  $TypeRel$  – ціле число ( $TypeRel \in Z$ ), що вказує на тип зв'язку;  $Obj1$  – перша сутність зі співвідношення;  $Obj2$  – друга сутність з співвідношення;  $Feature$  – атрибут, що вказує на характеристику зв'язку.

У залежності від приналежності атрибутів  $Obj1$  та  $Obj2$  окремим множинам з переліку  $M_{Heading}$ ,  $M_{Term}$ ,  $M_{Word}$  та  $M_{TestEx}$ , атрибут  $TypeRel$  приймає значення, вказані у таблиці 1.

Таблиця 1

Перелік значень атрибута  $TypeRel$  елементів множини зв'язків  $M_{Rel}$

Значення $TypeRel$	Приналежність $Obj1$	Приналежність $Obj2$	Значення $Feature$
1	$M_{Heading}$	$M_{Heading}$	відсутнє (Null)
2	$M_{Heading}$	$M_{Term}$	числовий показник важливості ключового терміну
3	$M_{Term}$	$M_{Word}$	порядковий номер слова в складі терміна
4	$M_{Term}$	$M_{TestEx}$	тип використання терміна у тестовому завданні

Відповідно до типів елементів, які сполучаються за допомогою елементів множини  $M_{Rel}$ , її структура може бути подана у вигляді:

$$M_{Rel} = M_{Rel:H-H} \cup M_{Rel:H-T} \cup M_{Rel:T-W} \cup M_{Rel:T-TE}, \tag{10}$$

де  $M_{Rel:H-H}$  – множина зв'язків між заголовками й заголовками,  $M_{Rel:H-T}$  – множина зв'язків між заголовками й ключовими термінами,  $M_{Rel:T-W}$  – множина зв'язків між ключовими термінами та словами,  $M_{Rel:T-TE}$  – множина зв'язків між ключовими термінами та тестовими завданнями.

Далі розглянуто детальніше особливості й атрибути кожної з наведених множин зв'язків між елементами семантичної структури ІНМ, а саме:  $M_{Rel:H-H}$ ,  $M_{Rel:H-T}$ ,  $M_{Rel:T-W}$ ,  $M_{Rel:T-TE}$ .

До множини зв'язків між заголовками  $M_{Rel:H-H}$  входять елементи, які визначають бінарні зв'язки між двома елементами множини  $M_{Heading}$ . Відтак, формула (10) набуває вигляду, згідно якого кожен елемент множини зв'язків між заголовками  $M_{Rel:H-H}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Rel:H-H} = (1, HeadingFrom, HeadingTo, 0), \tag{11}$$

де  $HeadingFrom$  – ідентифікатор елемента множини  $M_{Heading}$ , що вказує на заголовок – «батька» в ієрархічній структурі заголовків;  $HeadingTo$  – ідентифікатор елемента множини  $M_{Heading}$ , що вказує на заголовок – «нащадка» в ієрархічній структурі заголовків.

До множини зв'язків між заголовками й ключовими термінами  $M_{Rel:H-T}$  входять елементи, які визначають бінарні зв'язки між одним елементом множини  $M_{Heading}$  та одним елементом множини  $M_{Term}$ . Для множини  $M_{Rel:H-T}$  формула (10) набуває вигляду, згідно якого кожен елемент множини зв'язків між заголовками й ключовими термінами  $M_{Rel:H-T}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Rel:H-H} = (2, Heading, Term, Weight), \tag{12}$$

де  $Heading$  – ідентифікатор елемента множини  $M_{Heading}$ , що вказує на заголовок фрагменту контенту, в рамках якого вивчається термін;  $Term$  – ідентифікатор елемента множини  $M_{Term}$ , що вказує на ключовий термін, що вивчається;  $Weight$  – числовий показник важливості ключового терміну в межах відповідного

заголовку *Heading* фрагменту контенту інформаційного навчального матеріалу.

До множини зв'язків між ключовими термінами та словами  $M_{Rel:T-W}$  входять елементи, які визначають бінарні зв'язки між одним елементом множини  $M_{Term}$  та одним елементом множини  $M_{Word}$ . Для множини  $M_{Rel:T-W}$  формула (10) набуває вигляду, згідно якого кожен елемент множини зв'язків між заголовками й словами  $M_{Rel:T-W}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Rel:T-W} = (3, Term, Word, Sequence), \quad (13)$$

де *Term* – ідентифікатор елемента множини  $M_{Term}$ , що вказує на ключовий термін, що вивчається в ІНМ; *Word* – ідентифікатор елемента множини  $M_{Word}$ , що вказує на слово зі складу терміна; *Sequence* – ціле число ( $Sequence \in Z$ ), що вказує на порядковий номер визначеного слова *Word* в складі терміна *Term*.

До множини зв'язків між ключовими термінами та тестовими завданнями  $M_{Rel:T-TE}$  входять елементи, які визначають зв'язки між одним елементом множини  $M_{Term}$  та одним елементом множини  $M_{TestEx}$ . Для множини  $M_{Rel:T-TE}$  формула (10) набуває вигляду, згідно якого кожен елемент множини зв'язків між ключовими термінами та тестовими завданнями  $M_{Rel:T-TE}$  є кортежем наступного вигляду:

$$M_{Rel:T-TE} = (4, Term, TestEx, Loc), \quad (14)$$

де *Term* – ідентифікатор елемента множини  $M_{Term}$ , що визначає ключовий термін, що використовується в тестовому завданні; *TestEx* – ідентифікатор елемента множини  $M_{TestEx}$ , що вказує на визначене тестове завдання, *Loc* – ціле число ( $Loc \in Z$ ), що вказує на тип використання або місце використання терміну *Term* в тестовому завданні *TestEx*.

Таким чином, формальне подання семантичної структури курсу навчальної дисципліни у наведеному вигляді дозволяє використовувати її як модель для відображення семантичної структури прикладних ІНМ та ТНМ. До складу формального подання семантичної структури таких ІНМ входять множина заголовків, множина термінів, множина слів та множина зв'язків. До множини зв'язків входять елементи семантичної структури ІНМ і ТНМ, що визначають наявність та характер зв'язку між іншими елементами семантичної структури навчального курсу. Зокрема, множині зв'язків належать зв'язки між заголовками, зв'язки між заголовками й ключовими термінами, зв'язки між ключовими термінами та словами, зв'язки між ключовими термінами та тестовими завданнями.

#### Дискусія

Наповнення множин, що входять до складу моделі, надає можливість використання її для вирішення прикладних задач. З метою наповнення множин моделі семантичної структури курсу навчальної дисципліни пропонується використання ряду відповідних методів. Подання семантичної структури курсу навчальної дисципліни у наведеному вигляді визначає область прикладних задач, що можуть бути розв'язані з її використанням.

Модель семантичної структури курсу навчальної дисципліни передбачає **наповнення множин**, що входять до її складу:

- для множини заголовків  $M_{Heading}$ : множина назв заголовків  $M_{Name}$ , множина ідентифікаторів  $M_{ID}$  та множина рівнів в ієрархії  $M_{Grade}$ ;
- для множини термінів  $M_{Term}$ : множина назв термінів  $M_{TermName}$ , множина кількостей слів у терміні  $M_{TermNum}$  та множина булевих показників лематизації  $M_{TermLem}$ ;
- для множини слів  $M_{Word}$ : множина назв  $M_{WordName}$ , множина відповідних інфінітивних назв  $M_{WordNorm}$ , частин мови  $M_{WordPart}$  та множина булевих показників лематизації  $M_{WordLem}$ ;
- для множини тестових завдань  $M_{TestEx}$ : множина типів питань  $M_{Type}$ , множина кількостей правильних відповідей  $M_{Answers}$ , множина балів за замовчуванням  $M_{Points}$  та множина моделей формування тестових завдань  $M_{Model}$ ;
- для множини зв'язків наповнення полягає у визначенні всіх елементів для множин  $M_{Rel:H-H}$ ,  $M_{Rel:H-T}$ ,  $M_{Rel:T-W}$ ,  $M_{Rel:T-TE}$ ; до їх складу окрім типу зв'язку та двох сутностей співвідношення належать числовий показник важливості ключового терміну *Weight* для множини зв'язків між заголовками й ключовими термінами  $M_{Rel:H-T}$ , порядковий номер слова в складі терміна *Sequence* для  $M_{Rel:T-W}$ , номер типу використання або місце використання терміну в тестовому завданні *Loc* для  $M_{Rel:T-TE}$ .

**Методи наповнення елементів моделі** визначено наступні:

- метод побудови семантичної структури ІНМ для визначення елементів моделі: множини заголовків  $M_{Heading}$ , множини зв'язків між заголовками  $M_{Rel:H-H}$ ;
- метод визначення множини ключових термінів для визначення елементів моделі: множини ключових термінів  $M_{Term}$  і множини слів  $M_{Word}$ , множини зв'язків між заголовками і термінами  $M_{Rel:H-T}$ , множини зв'язків між термінами і словами  $M_{Rel:T-W}$ ;
- метод автоматизованої генерації прототипів тестових завдань для визначення елементів моделі: множини тестових завдань  $M_{TestEx}$ , множини зв'язків між тестовими завданнями і термінами  $M_{Rel:T-TE}$ .

Використання наведених трьох методів дозволяє здійснювати повне визначення елементів моделі, що відкриває можливості для її практичного застосування.

До **прикладних задач**, які дозволяють вирішувати запропонована модель семантичної структури курсу навчальної дисципліни, в першу чергу, належить автоматизоване формування множин тестових завдань [11], причому наведена модель передбачає забезпечення високого рівня дискримінативності та репрезентативності сформованих наборів тестових завдань. Закладені у модель параметри тестових завдань

надають можливість навчальним інформаційним системам адаптивно обирати тестові завдання в процесі тестування, що вирішує проблему рівномірного покриття тестом інформаційного навчального матеріалу при забезпеченні необхідної семантичної деталізації тестування [12].

До числа практичних задач, що можуть бути вирішені шляхом застосування запропонованої моделі семантичної структури курсу навчальної дисципліни, також належать: оцінка відповідності інформаційних навчальних матеріалів вимогам [13], оцінка відповідності наборів тестових завдань інформаційним навчальним матеріалам [14], реалізація гнучких алгоритмів тестування [12], автоматизація формування рефератів та анотацій до елементів інформаційних навчальних матеріалів [15] тощо.

### Висновки

В статті розглянуто інформаційну модель семантичної структури навчального курсу. Використання розробленої моделі при реалізації відповідних прикладних програмних систем дозволяє проводити автоматизоване формування наборів тестових завдань, забезпечуючи максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу.

Запропонована інформаційна модель семантичної структури навчального курсу є формальним поданням інформаційного та тестового навчальних матеріалів навчального курсу дисципліни. Формалізація моделі проводиться шляхом подання частини елементів навчального курсу як множини сутностей (заголовків, слів, ключових термінів, тестових завдань, зв'язків).

Одержана в результаті інформаційна модель є цілісним поданням семантичної структури навчального курсу, що може бути застосоване для реалізації інформаційної технології автоматизованого створення тестів до навчальних матеріалів.

Подальші дослідження спрямовані на дослідження ефективності застосування прикладних систем, що базуються на розробленій інформаційній моделі семантичної структури навчального курсу, та формуванні правил перетворень контенту для формування тестових завдань, що дозволить збільшити як різноманітність доступних для генерації варіантів тестового завдання за окремим фрагментом тексту, так і можливість охоплення максимального обсягу контенту навчального матеріалу при формуванні множини тестових завдань.

### Література

1. Снитюк В. Е. Интеллектуальное управление оцениванием знаний / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. – Черкассы, 2013. – 262 с.
2. Кліменко В. І. Аналіз сучасних методів генерації тестових завдань / В. І. Кліменко, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2016». – Хмельницький, 2016. – С. 77–84.
3. Титенко С. В. Генерація тестових завдань у системі дистанційного навчання на основі моделі формалізації дидактичного тексту / С. В. Титенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2009. – № 4. – С. 47–57.
4. Мазурець О. В. Використання спеціалізованих програмних розширень для автоматизації роботи з цифровими документами навчальних матеріалів / О. В. Мазурець, О. В. Ковальчук, В. О. Слободзян // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 1. – С. 61–69.
5. Мазурець О. В. Онтологічний підхід до побудови семантичної моделі навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 6. – С. 223–229.
6. Ventura J. New Techniques for Relevant Word Ranking and Extraction / J. Ventura, J. Silva // Proceedings of the artificial intelligence 13th Portuguese conference on Progress in artificial intelligence, EPIA'07. – Berlin : Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 691–702.
7. Ландэ Д. В. Компактифицированный горизонтальный граф видимости для сети слов / Д. В. Ландэ, А. А. Снарский // Труды Международной научной конференции «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2013. Знания и рассуждения» – Киев : КПИ, 2013. – С. 158–164.
8. Бармак О. В. Методи автоматизації визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Сер.: Технічні науки. Хмельницький. – 2015. – № 2(223). – С. 209–213.
9. Мазурець О. В. Інформаційна технологія автоматизованого визначення семантичних термінів в елементах навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 3. – С. 223–230.
10. Krak Y. The practice implementation of the information technology for automated definition of semantic terms sets in the content of educational materials / Y. Krak, O. Barmak, O. Mazurets // Proceedings of the 11th International Conference of Programming UkrPROG 2018. Kyiv, Ukraine. – 2018. – P. 245–254.
11. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, В. І. Кліменко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 5. – С. 93–103.
12. Бармак О. В. Застосування інформаційної технології гнучкого тестування рівня знань у середовищі Moodle / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, А. О. Матвійчук // Вісник Хмельницького національного

університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 3. – С. 103–115.

13. Коренчук О. В. Система інтелектуального аналізу відповідності лекційних матеріалів навчальних дисциплін стандартам освіти / О. В. Коренчук, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2014». – Хмельницький, 2014. – С. 191–201.

14. Поліщук А. О. Інформаційна технологія автоматизації аналізу відповідності тестових завдань лекційним матеріалам навчальних дисциплін / А. О. Поліщук, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2015». – Хмельницький, 2015. – С. 207–218.

15. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого анотування та реферування цифрових текстів / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, А. В. Живілік // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 4. – С. 147–158.

#### References

1. SNYTYUK, V. E. & YURCHENKO K. N. (2013) Intelligent Management of Knowledge Assessment. Cherkassy.
2. KLIMENKO, V. I. & MAZURETS, O. V. (2016) Analysis Of Modern Methods For Generation Of Test Tasks // Collection of scientific works on the materials of the X<sup>th</sup> international scientific and technical conference “Actual Problems of Computer Technologies 2016”. p. 77-84.
3. TYTENKO, S. V. (2009) Heneratsiya testovykh zavdan u systemi dystantsiynoho navchannya na osnovi modeli formalizatsiyi dydaktychnoho tekstu // Naukovi visti NTUU “KPI”, Issue 4, 2009 (253). p. 47–57.
4. MAZURETS, O. V., KOVALCHYK, O. V. & SLOBODZIAN, V.O. (2018) Using Specialized Software Packages for Automation of Work with Digital Documents of Educational Materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 1, 2018 (257). p. 61-69.
5. MAZURETS, O. V. (2017) Ontological Approach to Building a Semantic Model of Educational Materials. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 6, 2017 (255). p. 223-229.
6. VENTURA, J. & SILVA, J. (2007). New Techniques for Relevant Word Ranking and Extraction. In Proceedings of 13th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, Springer-Verlag, p. 691-702.
7. LANDE, D. V. & SNARSKIY, A. A. (2013) Kompaktificirovanniy Gorizontalnyy Graf Vidimosti dlya Seti Slov / D.V. Lande, A. A. Snarskiy // Trudi Mejdunarodnoy Nauchnoy Konferencii «Intelktualnyy Analiz Informacii IAI-2013. Znania I Rassujdenia». p 158-164.
8. BARMAK, O. V. & MAZURETS, O. V. (2015) Methods of Automation of Definition of Semantic Terms in Educational Materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 2, 2015 (223). p. 209-213.
9. MAZURETS, O. V. (2018) Information Technology for Automated Definition of Semantic Terms in the Content of the Elements of Educational Materials. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 3, 2018. p. 223-230.
10. KRAK, Y., BARMAK, O. & MAZURETS, O. (2018) The Practice Implementation of the Information Technology for Automated Definition of Semantic Terms Sets in the Content of Educational Materials. CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 11th International Conference of Programming UkrPROG'2018. p. 245-254.
11. BARMAK, O. V., MAZURETS, O. V. & KLIMENKO, V. I. (2017) Information Technology of Automated Creation of Test Tasks // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 5, 2017 (253). p. 93-103.
12. KORENCHUK, O. V. & MAZURETS, O. V. (2014) Systema intelektualnoho analizu vidpovidnosti lektsiynykh materialiv navchalnykh dystsyplin standartam osvity // Collection of scientific works on the materials of the VIII<sup>th</sup> international scientific and technical conference “Actual Problems of Computer Technologies 2014”. p. 191-201.
13. POLISHCHUK, A. O. & MAZURETS, O. V. (2015) Systema intelektualnoho analizu vidpovidnosti lektsiynykh materialiv navchalnykh dystsyplin standartam osvity // Collection of scientific works on the materials of the IX<sup>th</sup> international scientific and technical conference “Actual Problems of Computer Technologies 2015”. p. 207-218.
14. BARMAK, O. V., MAZURETS, O. V. & MATVIICHUK, A. O. (2017) Applying of the Information Technology of the Flexible Testing of Knowledges Level in Moodle Environment // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 3, 2017 (247). p. 103-115.
15. BARMAK, O. V., MAZURETS, O. V. & ZHYVILIK, A. V. (2017) Applying of the Information Technology of the Flexible Testing of Knowledges Level in Moodle Environment // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 4, 2017 (251). p. 147-158.

Рецензія/Peer review : 20.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатиї Р.В.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ ВИКЛАДАЧА ТА КАФЕДРИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Метою даного дослідження є розроблення інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри закладу вищої освіти. У статті проведено моделювання руху інформаційних потоків при плануванні роботи викладача закладу вищої освіти, моделювання інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри закладу вищої освіти, а також запропоновано структуру інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри закладу вищої освіти.*

*Ключові слова: інформаційна технологія, заклад вищої освіти (ЗВО), планування роботи викладача, планування роботи кафедри.*

T.O. HOVORUSHCHENKO, V.M. STECYUK, I.Y. LOPATTO  
Khmelnitskyi National University

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR SUPPORT OF THE PLANNING THE WORK OF THE LECTURER AND DEPARTMENT OF HIGHER EDUCATION INSTITUTION

*The aim of this study is the development of the information technology for support of the planning the work of the lecturer and department of higher education institution. The information flows in the planning of the work of the lecturer of the higher education institution (HEI) consist of types of work, that the lecturer can schedule for performing, units of their measurement and time norms (in hours), and of the tables for the planning of educational work, methodical work, scientific work, organizational work and upbringing work. The conducted modelling of the movement of information flows in the planning of the work of the HEI lecturer showed that it is necessary to develop an automated tool for the lecturer's planning. The information flows in the process of planning the work of the department of the higher education institution consist of the list of works and time assessments of lecturer's work for each section, and of the tables for planning the educational work, methodical work, scientific work, organizational work and upbringing work of the department. The conducted modelling of the movement of information flows in the process of planning the work of the department of HEI showed that due to the complexity, duration and routine of this work, it is necessary to develop the automated tool for planning the work of HEI department. The structure of information technology for support of the planning the work of the lecturer and department of HEI is developed, which provides a quick and easy planning of the work of HEI lecturer, and also automates the forming of the plan of the work of the department with the calculated number of hours for each section of the department's work and with the calculated total work of the department for the academic year.*

*Keywords: information technology, higher education institution (HEI), the planning the work of the lecturer, the planning the work of department.*

### Вступ

Розглянемо планування роботи викладача та кафедри закладу вищої освіти на прикладі виконання таких видів планування у Хмельницькому національному університеті.

Основним нормативним документом, який регламентує роботу кожного викладача Хмельницького національного університету (ХНУ), є його індивідуальний план, котрий затверджується засіданням кафедри і деканом факультету [1, 2]. Згідно з [3], одним з основних документів навчально-організаційного забезпечення кафедри є план роботи кафедри, який складається на основі індивідуальних планів викладачів кафедри.

Планування роботи викладачів ХНУ здійснюється згідно норм часу для планування й обліку навчальної, методичної, наукової, організаційної роботи та інших трудових обов'язків науково-педагогічних працівників Хмельницького національного університету [4].

Індивідуальний план роботи викладача ХНУ складається з 5 розділів – «Навчальна робота» (таблиця 1), «Методична робота» (таблиця 2), «Наукова робота» (таблиця 3), «Організаційна робота» (таблиця 4), «Виховна робота» (таблиця 5).

План роботи кафедри ХНУ складається з 5 розділів – «Обсяг навчальної роботи кафедри» (таблиця 6), «Навчально-методична робота» (таблиця 7), «Науково-дослідна робота» (таблиця 7), «Організаційно-методична робота» (таблиця 7), «Виховна робота зі студентами» (таблиця 7), які заповнюються на основі інформації з відповідних розділів індивідуальних планів роботи всіх викладачів кафедри.

Наразі викладачі вручну заповнюють та розраховують своє навантаження, а завідувач кафедри вручну опрацює індивідуальні плани роботи всіх викладачів кафедри, вибираючи з них необхідну інформацію по видах роботи, після чого вручну складає план роботи кафедри, що є досить трудомістким та рутинним процесом. Відтак *актуальною задачею* на сьогодні є розроблення інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри закладу вищої освіти, розв'язанню якої і присвячено дане дослідження.

Таблиця 1

**Розділ «Навчальна робота» індивідуального плану роботи викладача ХНУ**

№ з/п	Шифр спеціальності	Кількість студентів	Найменування дисципліни	Кількість годин											Всього годин
				Лекції	Консультації	Лабораторні заняття	Практичні заняття	Перевірка КРЗ	Курсове проектування	Заліки	Екзамени	Дипломне проектування	Керівництво практикою	Керівництво аспірантами	
<b>Семестр I</b>															
Разом за семестр I															
<b>Семестр II</b>															
Разом за семестр II															
Загалом за навчальний рік															

Таблиця 2

**Розділ «Методична робота» індивідуального плану роботи викладача ХНУ**

№ з/п	Назва методичної розробки (підручник, посібник, курс лекцій, вказівки, електронні версії цих робіт тощо)	Обсяг (др. арк.)	Кількість годин	Термін виконання

Таблиця 3

**Розділ «Наукова робота» індивідуального плану роботи викладача ХНУ**

№ з/п	Назва наукових досліджень, монографій, публікацій, керівництво НДС тощо	Одиниця виміру	Кількість годин	Термін виконання

Таблиця 4

**Розділ «Організаційна робота» індивідуального плану роботи викладача ХНУ**

№ з/п	Вид роботи	Кількісна характеристика	Термін виконання

Таблиця 5

**Розділ «Виховна робота» індивідуального плану роботи викладача ХНУ**

№ з/п	Вид роботи	Кількісна характеристика	Термін виконання

**Моделювання руху інформаційних потоків при плануванні роботи викладача закладу вищої освіти**

Основними джерелами інформації при плануванні роботи викладача Хмельницького національного університету є затверджені [4] норми часу для планування й обліку навчальної, методичної, наукової, організаційної роботи та інших трудових обов'язків науково-педагогічних працівників Хмельницького національного університету, які надають перелік видів роботи за кожним з розділів індивідуального плану роботи викладача, а також норму часу (в годинах) для одиниці вимірювання. Із зазначених норм часу викладач обирає ті види робіт, які він планує виконати за кожним з розділів протягом навчального року, встановлює їх кількісну оцінку та розраховує години, які будуть витрачені на кожен вид роботи. Крім цього, при плануванні роботи викладач повинен враховувати й затверджену структуру індивідуального плану роботи викладача, представлену в таблицях 1–5.

Таблиця 6

**Розділ «Обсяг навчальної роботи кафедри» плану роботи кафедри ХНУ**

Семестр	Форма навчання	Лекції	Практичні заняття	Лабораторні заняття	Семинарські заняття	Індивідуальні заняття	Консультації	Екзаменаційні консультації	Перевірка контрольних робіт, що виконуються під час аудиторних занять	Перевірка контрольних робіт, що виконуються під час самостійної роботи	Керівництво і приймання індивідуальних завдань		Заліки	Семестрові екзамени	Керівництво навчальною і виробничою практикою	Державні екзамени	Керівництво, консультування, рецензування та проведення захисту дипломних робіт	Керівництво аспірантами, стажуванням викладачів	Загальний обсяг	
											рефератів, аналітичних оглядів, перекладів	розрахункових, графічних і розрахунково-графічних робіт								
<b>I</b>	Денна																			
	Заочна																			
	Дистанційна																			
	Екстернат																			
	<b>Разом</b>																			
<b>II</b>	Денна																			
	Заочна																			
	Дистанційна																			
	Екстернат																			
	<b>Разом</b>																			
<b>Усього за рік</b>	Денна																			
	Заочна																			
	Дистанційна																			
	Екстернат																			
	<b>Разом</b>																			

Таблиця 7

**Розділи «Навчально-методична робота», «Науково-дослідна робота», «Організаційно-методична робота», «Виховна робота зі студентами» плану роботи кафедри ХНУ**

№ з/п	Вид робіт	Об'єм	Виконавець	Термін виконання	Відмітка про виконання

Наприклад, викладач планує розробити новий курс лекцій з певної навчальної дисципліни, який складатиметься з 8 лекцій. Встановлено норму часу – 12 годин на 1 лекцію. Тоді викладач витратить 96 годин на розроблення такого курсу лекцій. Цей вид роботи викладач повинен включити в розділ «Методична робота» свого індивідуального плану роботи. Аналогічно виконується планування роботи й за іншими розділами індивідуального плану роботи викладача. Загальне річне навантаження викладача всіма видами роботи не повинно перевищувати 1542 години [1, 2].

Структура інформаційних потоків при плануванні роботи викладача закладу вищої освіти представлена на рис. 1.



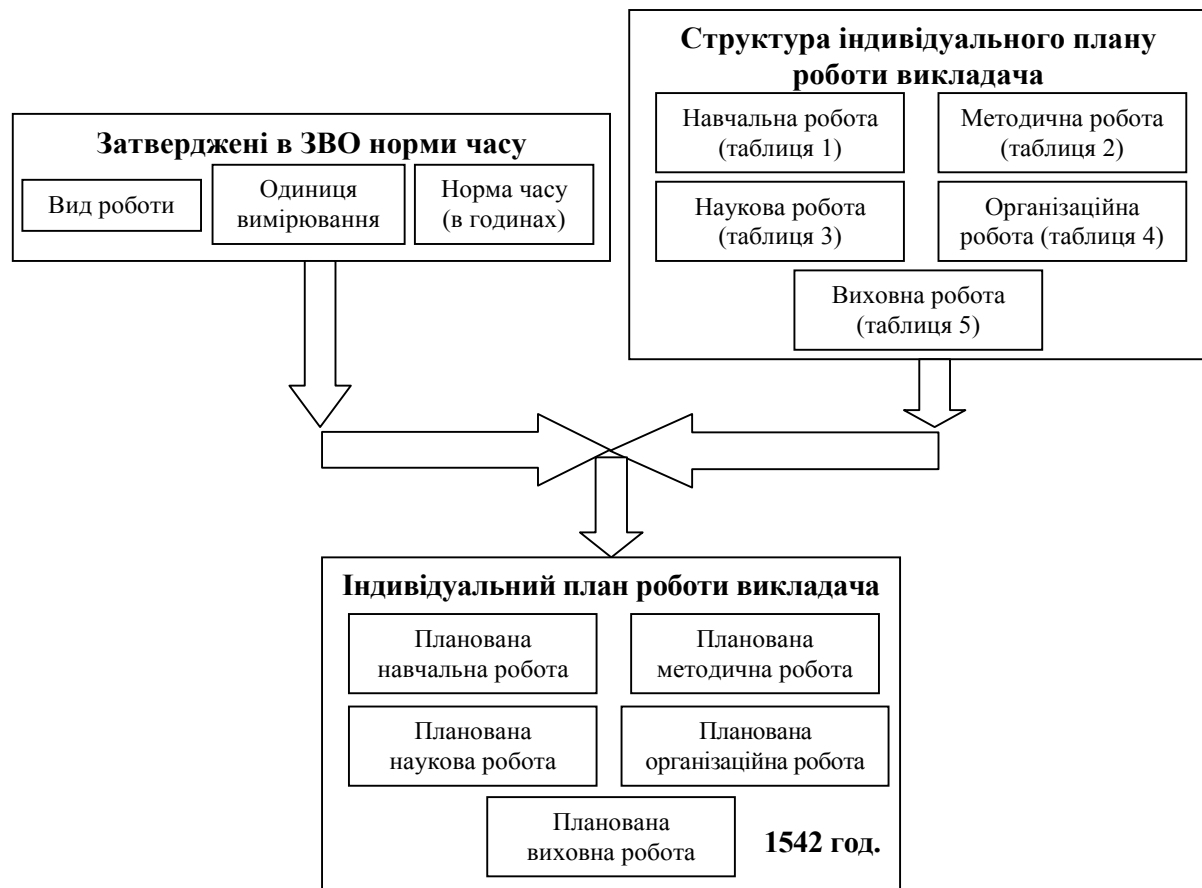


Рис. 1. Структура інформаційних потоків при плануванні роботи викладача закладу вищої освіти

Проведене моделювання руху інформаційних потоків при плануванні роботи викладача ЗВО доводить рутинність та трудомісткість цієї роботи і показує необхідність розроблення автоматизованого засобу для планування роботи викладача.

#### Дослідження інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри закладу вищої освіти

Основними джерелами інформації при плануванні роботи кафедри Хмельницького національного університету є затверджені засіданням відповідної кафедри та деканом відповідного факультету індивідуальні плани роботи викладача, які надають перелік робіт та часові оцінки робіт викладача за кожним з розділів. Із переліку видів робіт завідувач кафедри вибирає певний вид роботи (по порядку), за яким вибирає плановані години і виконавців – викладачів, який запланували такий вид роботи. Крім цього, при плануванні роботи викладач повинен враховувати й затверджену структуру плану кафедри, представлену в таблицях 6-7.

Наприклад, «Викладач 1» планує в розділі «Методична робота» свого індивідуального плану роботи розробити новий курс лекцій з певної навчальної дисципліни, який складатиметься з 8 лекцій, тобто планує витратити на цей вид роботи 96 годин, а «Викладач 2» планує в розділі «Методична робота» свого індивідуального плану роботи розробити новий курс лекцій з іншої навчальної дисципліни, який складатиметься з 18 лекцій, тобто планує витратити на цей вид роботи 216 годин. Тоді завідувач кафедри в розділі «Навчально-методична робота» плану кафедри виконує наступні записи – таблиця 8. Аналогічні операції потрібно провести для всіх видів робіт, які були плановані викладачами кафедри за даним розділом. Після заповнення розділу завідувач кафедри повинен вручну порахувати кількість годин навантаження кафедри за розділом плану роботи кафедри. Аналогічно виконується планування роботи кафедри й за іншими розділами плану кафедри. Наприклад, «Викладач 1» планує в розділі «Наукова робота» свого індивідуального плану роботи опублікувати наукову статтю розміром 0,5 д.а. у фаховому науковому виданні, тобто планує витратити на цей вид роботи 150 годин, а «Викладач 2» планує в розділі «Наукова робота» свого індивідуального плану роботи опублікувати наукову статтю розміром 0,75 д.а. у фаховому науковому виданні, тобто планує витратити на цей вид роботи 225 годин. Тоді завідувач кафедри в розділі «Науково-дослідна робота» плану кафедри виконує наступні записи – таблиця 9. Після заповнення всіх розділів плану кафедри та розрахунку кількостей годин навантаження кафедри за всіма розділами плану роботи завідувач кафедри повинен вручну порахувати кількість годин навантаження кафедри за всіма розділами плану роботи кафедри. Загальне річне навантаження кафедри повинно складати 1542 години \* кількість ставок кафедри.

Таблиця 8

**Приклад заповнення розділу «Навчально-методична робота» плану роботи кафедри ХНУ**

№ з/п	Вид робіт	Об'єм	Виконавець	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розроблення нового курсу лекцій	96 год	Викладач 1	Протягом року	
		216 год	Викладач 2	Протягом року	

Таблиця 9

**Приклад заповнення розділу «Науково-дослідна робота» плану роботи кафедри ХНУ**

№ з/п	Вид робіт	Об'єм	Виконавець	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Опублікування наукових статей у фахових наукових виданнях	150 год	Викладач 1	Протягом року	
		225 год	Викладач 2	Протягом року	

Структура інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри закладу вищої освіти представлена на рис. 2.

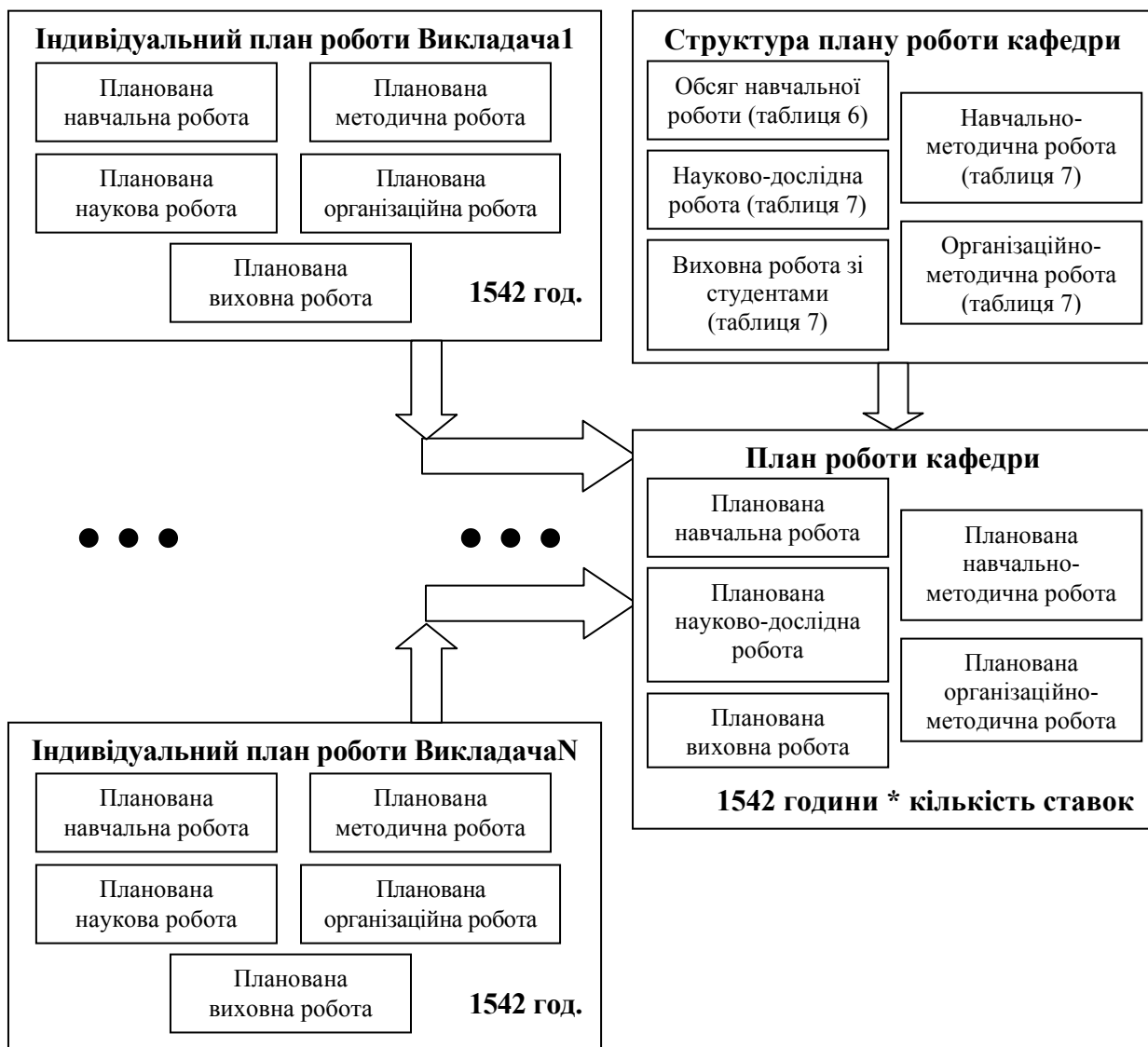


Рис. 2. Структура інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри закладу вищої освіти

Проведене моделювання руху інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри ЗВО доводить рутинність та трудомісткість цієї роботи і показує необхідність розроблення автоматизованого засобу для планування роботи кафедри.

**Структура інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри закладу вищої освіти**

На основі проведеного моделювання руху інформаційних потоків при плануванні роботи викладача ЗВО та в процесі планування роботи кафедри ЗВО, враховуючи необхідність розроблення автоматизованого

засобу для планування роботи викладачів та кафедри ЗВО, розробимо інформаційну технологію підтримки планування роботи викладача та кафедри ЗВО на прикладі Хмельницького національного університету.

Мета розробленої інформаційної технології – полегшення планування роботи викладача та кафедри ЗВО, автоматизація рутинної роботи викладача та завідувача кафедри в процесі виконання такого планування.

Структура інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри ЗВО представлена на рис. 3.

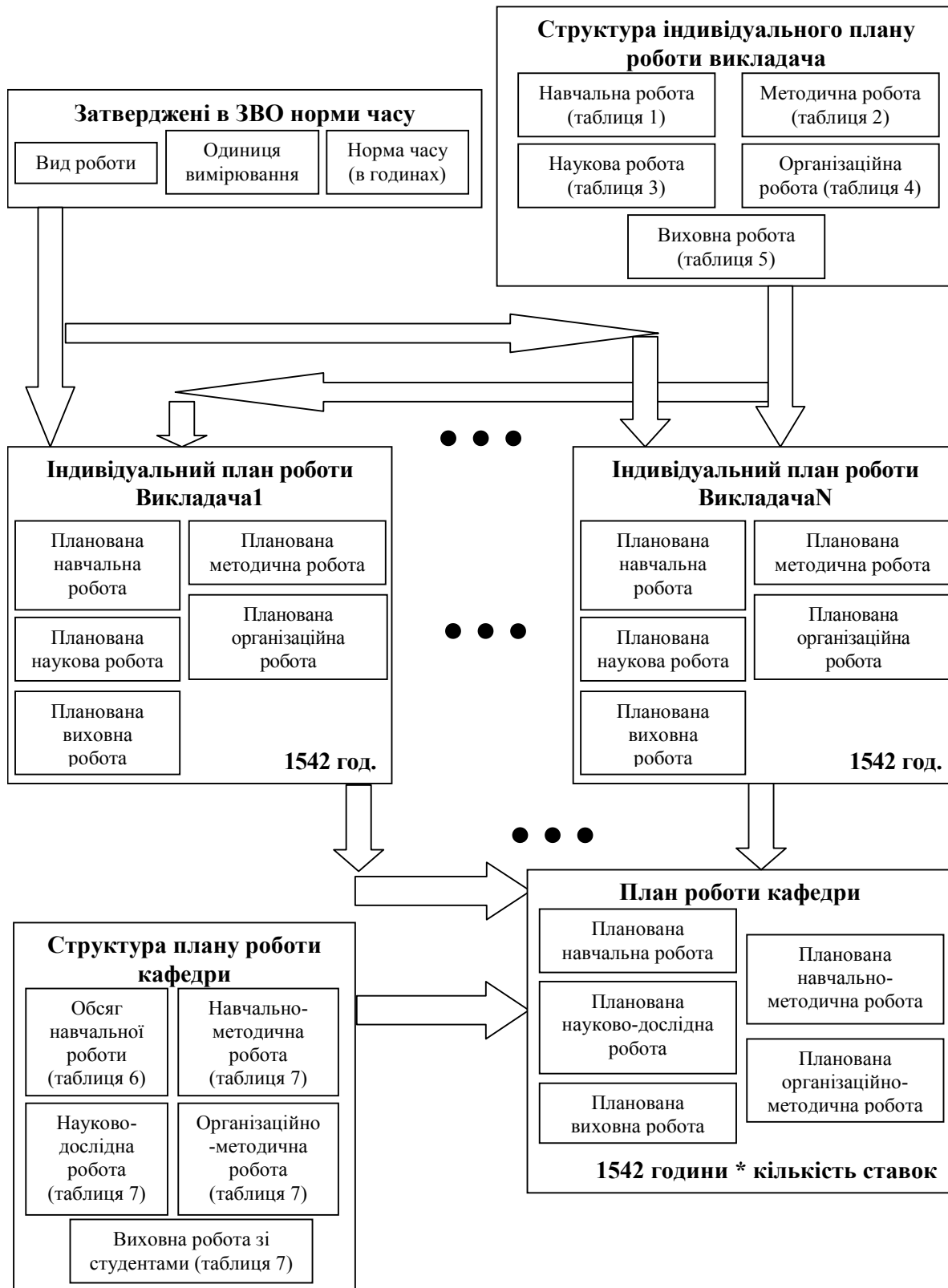


Рис. 3. Структура інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри ЗВО

Пропонована інформаційна технологія дає можливість викладачу ЗВО швидко та легко запланувати

свою роботу на навчальний рік, а завідувачу кафедри надає готовий план роботи кафедри з розрахованими кількостями годин по кожному розділу навантаження кафедри та з розрахованим загальним навантаженням кафедри на навчальний рік.

### Висновки

На основі затверджених в ХНУ норм часу з врахуванням структури індивідуального плану роботи викладача формується індивідуальний план роботи викладача. Інформаційні потоки при плануванні роботи викладача закладу вищої освіти складаються з видів робіт, які може планувати для виконання викладач, одиниць їх вимірювання та норми часу (в годинах), а також з таблиць для планування навчальної роботи, методичної роботи, наукової роботи, організаційної роботи та виховної роботи. Проведене моделювання руху інформаційних потоків при плануванні роботи викладача ЗВО показало, що необхідним є розроблення автоматизованого засобу для планування роботи викладача.

На основі затверджених засіданням кафедри та деканом факультету індивідуальних планів роботи викладачів кафедри формується план роботи кафедри. Інформаційні потоки в процесі планування роботи кафедри закладу вищої освіти складаються з переліку робіт та часових оцінок робіт викладачів за кожним з розділів, а також з таблиць для планування навчальної, навчально-методичної, науково-дослідної, організаційно-методичної та виховної роботи кафедри. Проведене моделювання руху інформаційних потоків в процесі планування роботи кафедри ЗВО показало, що в зв'язку з трудомісткістю, тривалістю та рутинністю цієї роботи необхідним є розроблення автоматизованого засобу для планування роботи кафедри ЗВО.

Розроблено структуру інформаційної технології підтримки планування роботи викладача та кафедри ЗВО, яка забезпечує швидке та легке планування роботи викладача ЗВО, а також автоматизує побудову плану роботи кафедри з розрахованими кількостями годин по кожному розділу навантаження кафедри та з розрахованим загальним навантаженням кафедри на навчальний рік.

### Література

1. Система внутрішнього забезпечення якості освітньої діяльності : зб. нормативних документів / упоряд. : В. І. Бегняк, Г. В. Красильникова. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 446 с.
2. Положення про щорічне рейтингове оцінювання роботи науково-педагогічних працівників Хмельницького національного університету [Електронний ресурс] : затв. Вченою радою ХНУ протокол від 29.01.2015 № 7. – Режим доступу : <http://www.khnu.km.ua/root/res/700-100-14.pdf> (дата звернення 20.10.2018). – Назва з екрану.
3. Положення про кафедру Хмельницького національного університету [Електронний ресурс] : затверджено Вченою радою ХНУ протокол від 29.05.2015 № 11. – Режим доступу : <http://www.khnu.km.ua/root/res/700-100-49-9.pdf> (дата звернення 20.10.2018). – Назва з екрану.
4. Тимчасові норми часу для планування й обліку навчальної, методичної, наукової, організаційної роботи та інших трудових обов'язків науково-педагогічних працівників Хмельницького національного університету : затверджено Вченою радою ХНУ протокол від 01.09.2016 № 1.

### References

1. Systema vnutrishnogo zabezpechennya yakosti osvitnoi diyalnosti: zb. normatyvnyh dokumentiv / uporyad: V. I. Behnyak, H. V. Krasyl'nykova. – Khmel'nitsky: KhNU, 2015. – 446 s.
2. Polojennya pro shchorichne reitingove otsinuvannya roboty naukovo-pedagogichnyh pratsivnykiv Khmenitskogo natsionalnogo universitetu (zatverdjeno Vchenoyu radoyu KhNU protocol vid 29.01.2015 No.7) [Elektronnyi resurs]. – Rejym dostupu: <http://www.khnu.km.ua/root/res/700-100-14.pdf> (data zvernennya 20.10.2018). – Nazva z ekranu.
3. Polojennya pro kafedru Khmenitskogo natsionalnogo universitetu (zatverdjeno Vchenoyu radoyu KhNU protocol vid 29.05.2015 No.11) [Elektronnyi resurs]. – Rejym dostupu: <http://www.khnu.km.ua/root/res/700-100-49-9.pdf> (data zvernennya 20.10.2018). – Nazva z ekranu.
4. Tymchasovi normy chasu dlya planuvannya i obliku navchalnoi, metodichnoi, naukovoi, organizatsiynoi roboty ta inshyh trudovyh obovyazkiv naukovo-pedagogichnyh pratsivnykiv Khmenitskogo natsionalnogo universitetu (zatverdjeno Vchenoyu radoyu KhNU protocol vid 01.09.2016 No.1).

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ, О.М. КОРОТИНСЬКИЙ  
Хмельницький національний університет

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧИХ СУМАТОРІВ У ЯДРІ СИНТЕЗАТОРА

Розглянуто основні типи суматорів, що використовуються для побудови фазового акумулятора DDS. Проаналізовано причини виникнення затримок в ядрі DDS, а також методи їх зменшення. Проведено аналіз затримки сигналу переносу в різних типах суматорів, обґрунтовано доцільність використання суматора із пропуском переносу зі змінною довжиною блоку. Наведено функціональну схему 16-розрядного суматора із пропуском переносу зі змінною довжиною блоку. Наведено структурну схему та опис макету для дослідження DDS-генераторів різних типів та їх параметрів. Застосування запропонованого суматора дозволить збільшити швидкодію акумулятора фази DDS синтезатора, без значного збільшення споживання енергії синтезатором.

Ключові слова: прямий синтезатор частоти, акумулятор фази, суматор, затримка сигналу переносу, ядро синтезатора.

O.I. POLIKAROVSKYKH, O.M. KOROTINSKIY  
Khmelnytsky National University

## THE METHOD OF INCREASING THE SPEED OF SYNTHESIZER OF DIGITAL DIRECT SYNTHESIS BY APPLICATION OF HIGH-SPEED ADDERS IN THE CORE SYNTHESIZER

The main types of adders used to construct a DDS phase accumulator are considered. The reasons for the occurrence of delays in the DDS core and the methods of their reduction are analyzed. The principle of DDS synthesizer is given, as well as its structural units are described. The attention is paid to the importance of studying ways to reduce the delay time when calculating the phase code in the phase accumulator. The analysis of delay of the transfer signal in various types of adders was carried out, the expediency of using the adder with a transfer delay with variable length of the block was substantiated. The functional diagram of a 16-bit adder with a transport delay with a variable length of the block is given. The analysis of delay of a transfer signal in various types of adders was carried out. The structural diagram and description of the model for the study of different types of DDS generators and their parameters are presented. The circuit diagram of the experimental layout of the direct synthesis synthesizer is given. His work principle is described. The use of an open platform software platform as the basis of the synthesizer control system is commonly used. The main functions and parts of the experimental layout are described. Describes the principle of the layout, its main characteristics. Grounded using open hardware and software platform as the basis for building a laboratory model. The application of the proposed adder will increase the performance of the DDS phase accumulator of the synthesizer, without significantly increasing the power consumption of the synthesizer. The use of complements of the classical numerical basis of maximum speed in the core of the synthesizer of direct synthesis will allow to create cheap and simple in designing and manufacturing integrated circuits synthesizers, and increase the number of areas of their application.

Keywords: direct frequency synthesizer (DDS), phase accumulator, adder, carry signal delay, core synthesizer.

### Постановка задачі

Розвиток сучасної радіоелектроніки рухається в напрямку поступової заміни аналогових систем на цифрові. Одним із прикладів є стрімкий розвиток DDS-синтезаторів, які мають багато переваг перед аналоговими синтезаторами та синтезаторами на основі ФАПЧ [1]. Найважливішими перевагами DDS над іншими системами є неперервність сигналу при переналаштуванні частоти, висока стабільність генерованої частоти, а також можливість керування параметрами вихідного сигналу за допомогою мікроконтролерів та комп'ютерних систем. Але є один важливий недолік синтезаторів DDS, який обмежує сферу їх застосування. Мова йде про обмеженість частотного діапазону DDS синтезаторів, через затримку формування адреси комірки ПЗП, яка виникає через затримку переносу в суматорі акумулятора фази DDS. Завдання роботи є виявлення оптимальної структури суматора акумулятора фази з точки зору мінімізації часу затримки сигналу переносу у ядрі синтезатора.

### Аналіз досліджень та публікацій

В ідеальному варіанті максимальна вихідна частота сигналу, синтезованого цифровим синтезатором  $f_{max}$  згідно теореми Котельникова буде визначатись:

$$f_{max} = \frac{f_t}{2} \quad (1)$$

де  $f_t$  – тактова частота, або частота опорного генератора.

На рис. 1 наведено структурну схему прямого цифрового синтезатора з акумулятором фази. Принцип його роботи наступний. На вхідний регістр синтезатора подається код частоти, який з нього потрапляє на акумулятор фази. Акумулятор фази складається із суматора та регістра, в якому зберігається код поточної комірки пам'яті ПЗП. Цей код за зворотнім зв'язком потрапляє на вхід суматора, в якому відбувається підсумовування коду поточної комірки ПЗП разом із кодом частоти. Таким чином визначається з якої наступної комірки буде зчитаний код амплітуди, який записаний в ПЗП. Зазвичай в ПЗП записується сукупність кодів амплітуди, які відповідають четверті синусоїди, таким чином ПЗП виконує операцію перетворення фаза/амплітуда. Код амплітуди з ПЗП передається на вхід цифро-аналогового

перетворювача який перетворює цифрові вибірки амплітуди в аналогове значення амплітуди. ФНЧ обмежує смугу пропускання вихідної частоти.

Таким чином, максимальна частота буде визначатись за формулою (1), якщо відсутня затримка при проведенні операції підсумовування в суматорі акумулятора фази.

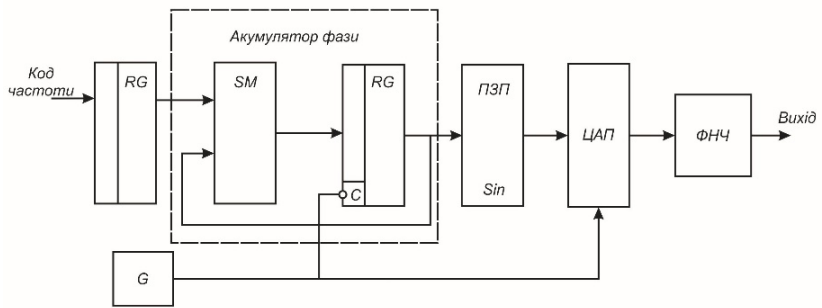


Рис. 1. Структурна схема прямого цифрового синтезатора з акумулятором фази

Крок перебудови частоти буде визначатись за формулою (2).

$$\Delta f = \frac{f_t}{2^N} \tag{2}$$

Очевидно, що паралельний суматор має більшу швидкодню ніж послідовний. Розглянемо найпростіший варіант паралельного суматора із послідовним переносом, або RCA (рис. 2) [2].

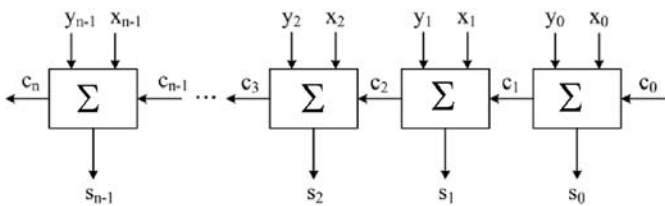


Рис. 2. Багаторозрядний паралельний n-бітний суматор із послідовним переносом [2]

Такий суматор складається із набору однорозрядних суматорів, кількість яких обирається в залежності від розрядності чисел, які необхідно підсумовувати. Кожен суматор підсумовує пару бітів вхідних чисел із врахуванням переносу.

Для схеми рис.2 час підсумовування в загальному випадку буде рівний:

$$t_s = n t_d \tag{3}$$

де  $t_s$  – час проведення операції додавання;  $n$  – розрядність суматора;  $t_d$  – час затримки передачі сигналу переносу до виходу суматора з набору.

Таким чином, для додавання двох 32-бітних чисел необхідно використати 32 однорозрядних суматора.

Перенос формується, якщо обидва доданки є логічними «1», вхідний перенос передається, якщо один із доданків є 1, а інший 0. Таким чином сигнал переносу  $c_{i+1}$  на  $i$ -му кроці буде визначатись за формулою (4):

$$c_{i+1} = x_i + (x_i \oplus y_i) c_i \tag{4}$$

Як вказано вище, для реалізації 32-розрядного суматора необхідно 32 однорозрядних суматора, таким чином, видно, що із зростанням розрядності ростуть апаратні затрати на виконання такого пристрою. За рахунок послідовного переносу RCA суматор по швидкодії буде близький до повністю послідовного суматора.

Таким чином, при проектуванні суматора для ПЦС (прямого цифрового синтезу) необхідно рухатись одночасно в двох напрямках: спрощення структури суматора та прискорення швидкодії за рахунок зменшення затримки сигналу переносу.

Розглянемо суматор CLA [3]. Схема суматора з паралельним переносом (рис.3) складається з декількох суматорів з меншою розрядністю і схеми прискореного переносу.

У загальному випадку для сигналу переносу  $i$ -го розряду справедливо співвідношення:

$$C_i = G_{i-1} + P_{i-1} \cdot C_{i-1}, \tag{5}$$

$$G_i = A_{i-1} \cdot B_{i-1}, \tag{6}$$

$$P_i = A_{i-1} + B_{i-1}. \tag{7}$$

Сигнал  $C_i = G_{i-1} + P_{i-1} \cdot C_{i-1}$  (5) називають функцією генерації переносу. Сигнал  $P_i$  показує, чи передається отриманий в молодшому розряді сигнал перенесення  $C_i$  далі, тому він називається функцією поширення переносу.

Як впливає з наведених виразів, час формування сигналу перенесення в будь-який розряд за допомогою допоміжних функцій  $G_i$  і  $P_i$  визначається тільки часом затримки поширення сигналу на двох логічних елементах І та АБО, де обчислюється значення.

Архітектура Брента-Кунга є також схемою з прискореним переносом, але оптимізованою по площі інтегральної схеми за рахунок невеликого зниження швидкодії [3].

Крім суматорів із прискореним переносом, існують також схеми суматорів із пропуском переносу. Розглянемо докладніше декілька основних підходів до проектування таких суматорів.

Суматор умовного підсумовування (рис. 4) формує два набори виходів для кожної групи  $k$ -біт операндів.

Кожен набір включає  $k$ -бітів суми та вихідні сигнали переносу. Групи формуються наступним чином, одна – для випадку коли вхідний сигнал переносу дорівнює нулю, інша – для випадку коли сигнал переносу дорівнює одиниці. Коли значення вхідного сигналу переносу стає відомим, обирається правильний набір виходів із двох варіантів, не очікуючи на перенос через усі  $k$  позицій.

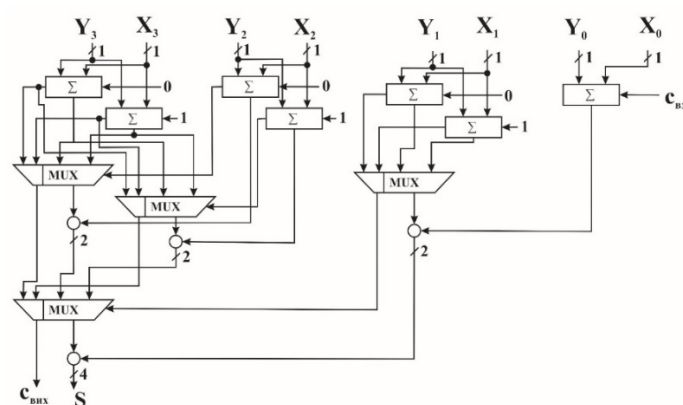


Рис. 4. 4-бітний суматор умовного підсумовування [2]

суматора і, відповідно, зростання споживання енергії.

В основі суматора із вибором переносу (рис.5) лежить принцип схожий на суматор умовного підсумовування. Кожна група обчислює дві групи біт суми і сигналів переносу. Одна група формується для випадку коли вхідний сигнал переносу дорівнює нулеві, а інша група для випадку коли сигнал переносу дорівнює одиниці. Коли вхідний сигнал переносу в групі визначено, значення суми вибирається із двох станів. На відміну від суматора умовного підсумовування, розміри  $k$ -ї групи вибирається так що вирівняти затримку біжучого переносу в межах груп і затримку у ланцюгові вибору переносу від першої до  $k$ -ї групи. У цьому суматорі довжини груп відповідають простій арифметичній прогресії 1, 1, 2, 3,...

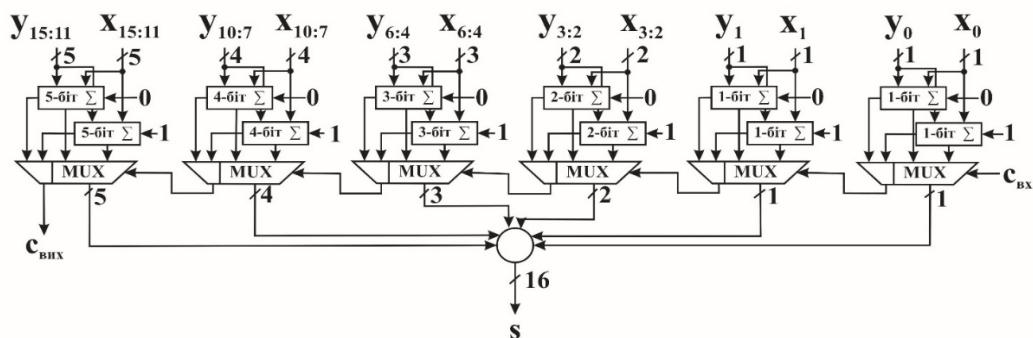


Рис. 5. 16-бітний суматор із вибору переносу [2]

Компромiсом між збільшенням швидкодії суматора та зниження площі кристалу та споживаної потужності є використання схем із пропуском переносу. Існують дві основні такі схеми: суматор із фіксованою довжиною блоку та суматор із змінною довжиною блоку.

На рис.6 наведено схему пропуску сигналу переносу. Вона складається з  $k$  біт. В суматорі із пропуском переносу, будь який стан може бути пропущений для якого  $P_m = x_m$  або  $y_m = 1$ , де  $P_m$  відображає значення  $m$ -го переносу.

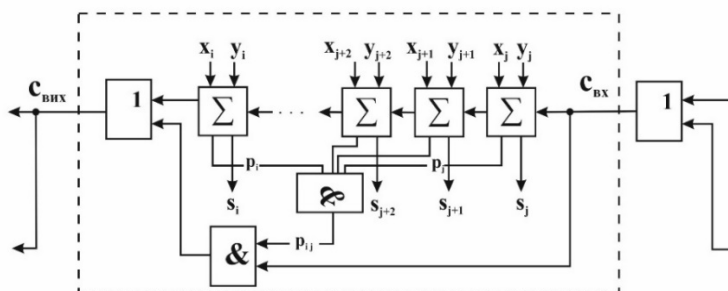


Рис. 6. Схема пропуску сигналів переносу [2]

Структура суматора поділена на блоки послідовних станів за простою послідовною схемою. Кожен блок також генерує сигнал переносу блоку, що дорівнює одиниці, якщо усі внутрішні боки задовольняють умові  $P_m$ . Цей сигнал може бути використаний для дозволу вхідного сигналу, для пропуску усього блоку і генерування вихідного сигналу переносу блоку.

На рис. 7 наведемо схему 8-бітного суматора із пропуском сигналу переносу, який складається із 4-х блоків фіксованої довжини в 2 біти. Розмір фіксованого блоку має бути обраний таким чином, щоб час затримки поширення у найдовшому колі був мінімальний. Оптимальним вважається розмір блоку:

$$k_o = \sqrt{\frac{n}{2}} \tag{8}$$

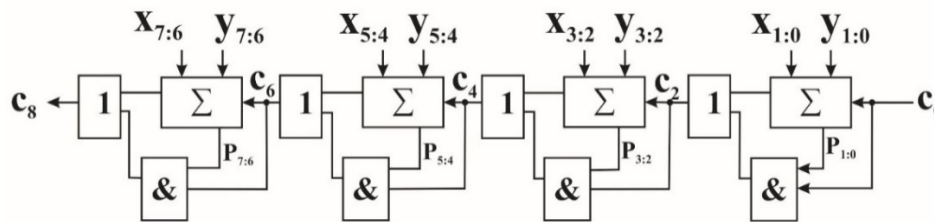


Рис. 7. 8-бітний суматор із пропуском переносу з фіксованою довжиною блоку [2]

На рис.8 представлено 16-бітний суматор із пропуском переносу, що складається із 7-ми блоків різної довжини. Оптимальною організацією розмірів блоків є L блоків з розміром  $k_1, k_2, \dots, k_i = 1, 2, 3, \dots, 3, 2, 1$ . Це зменшує послідовну затримку переносу крізь ці блоки.

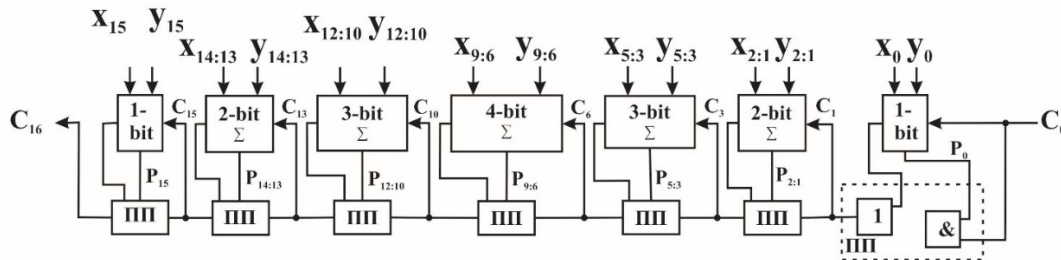


Рис. 8. 16-бітний суматор із пропуском переносу із змінною довжиною блоку [2]

Перспективним також є використання паралельних суматорів без переносу, що працюють із кодами Галуа, але вони вимагають додаткових перетворювачів для переходу із однієї системи кодування в іншу, що також вносить затримку при проведенні операції підсумовування [4].

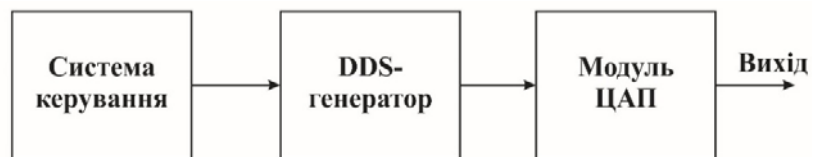


Рис. 9. Структурна схема лабораторного макету

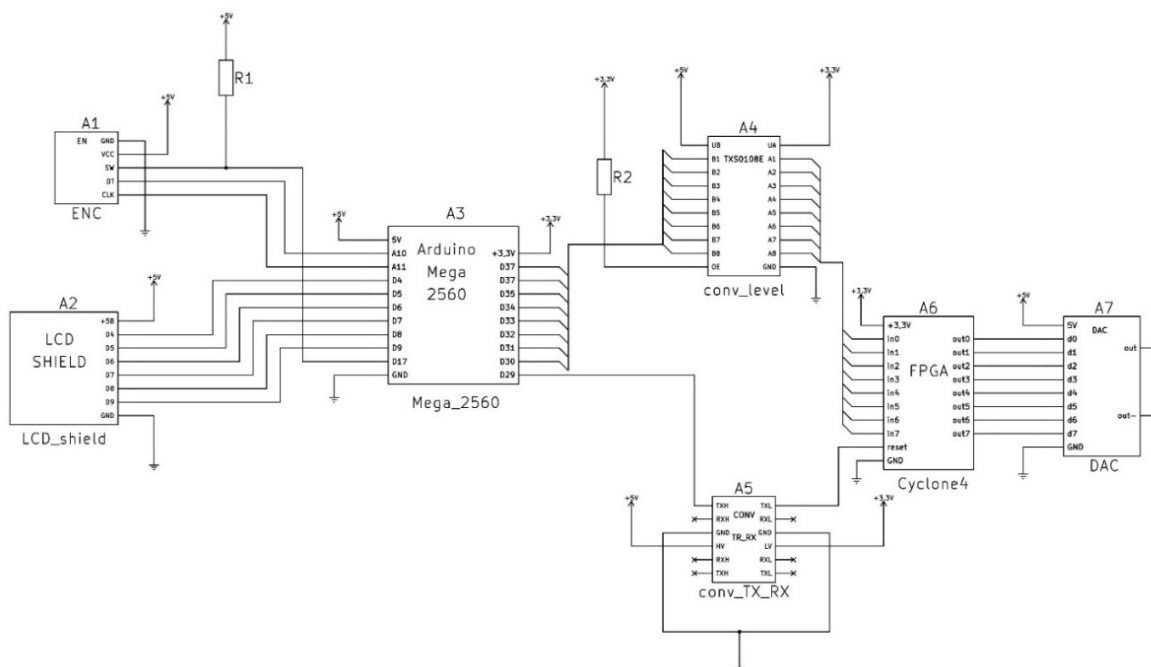


Рис. 10. Принципова схема лабораторного макета

### Експериментальна частина

Для можливості подальшого дослідження властивостей прямих цифрових синтезаторів різних типів було спроектовано та побудовано лабораторний макет на базі ПЛІС Cyclone IV, в якості DDS- генератора, та плати Arduino Mega, як основи системи керування.

Загальну структурну схему макету наведено на рис.9. Основою є плата ПЛІС Cyclone IV, на якій крім самої мікросхеми програмованої логіки змонтована уся необхідна для її функціонування об'язка. В



ПЛІС запрограмовано код DDS- генератора, наведеного в [5].

Принципову схему лабораторного макета наведено на рис.10. Її основою є плата Arduino Mega. Розглядався варіант використання Arduino Uno, але так як генератор є паралельним, Uno не забезпечувала одного повного 8-бітного порту мікроконтролера, тому було вирішено обрати Arduino Mega.

Керування генератором здійснюється за допомогою енодера, який підключено до плати Arduino Mega. Плата Arduino забезпечує інтерфейс користувача, в який крім енодера входить, також, LCD екран 16x2, який побудовано на базі добре відомого контролера HD44780. На екрані відображається поточна частота генератора та крок переналаштування частоти. Як вже було сказано вище, керування частоти генератора здійснюється за допомогою енодера, крок переналаштування перемикається кнопкою енодера.

Оскільки функціональний блок Arduino Mega живиться напругою 5 В від стабілізатора AMS1117, а Cyclone IV – напругою 3,3 В то напряму підключити виводи плат між собою неможливо, тому було введено конвертори рівнів. Конвертор А4, побудований на базі мікросхеми TXS0108E, забезпечує узгодження рівнів сигналу коду фази. Інший конвертор – А5 – необхідний для конвертації сигналу RESET, який забезпечує скидання регістру фази акумулятора DDS. Конвертор А5 являє собою двохканальний конвертор рівнів для UART, але він цілком може працювати як звичайний чотирирох розрядний конвертер, він побудований на КМОП транзисторах, принципова схема його одного каналу наведена на рис.11.

Код системи керування засновано на код популярного DDS-генератора на Arduino на базі мікросхеми DDS AD9850 фірми Analog Devices. LCD екран підключено стандартним способом, з використанням бібліотеки LiquidCrystal. Опрацювання енодера заведено на переривання Int18 та Int19, лістинг опрацювання повороту енодера наведено на рис. 12:

```
// обробка енодера
unsigned char result = r.process();
if (result) {
  if (result == DIR_CW){rx=rx+increment;}
  else {rx=rx-increment;}
  // кінець обробки валкодера
  if (rx > 250000000){rx=(250000000)}; // ВЕРХНІЙ VFO LIMIT
  if (rx < 5){rx=5}; // НИЖНІЙ VFO LIMIT
}
}
```

Рис. 12. Лістинг функцій обробки сигналу енодера

Таким чином, для передачі коду фази використовується паралельний інтерфейс. Передача коду фази на вихід здійснюється за три етапи: скидання регістру фази DDS за допомогою перемикавання лінії REST в «0», запис коду фази в порт “C” мікроконтролера, запис коду фази в регістр DDS за допомогою встановлення лінії RESET в «1».

Оскільки вихід системи керування є 8-ми бітним, а DDS- генератор 32- бітним, то усичення коду фази відбувається вже на етапі запису коду фази у вхідний регістр DDS.

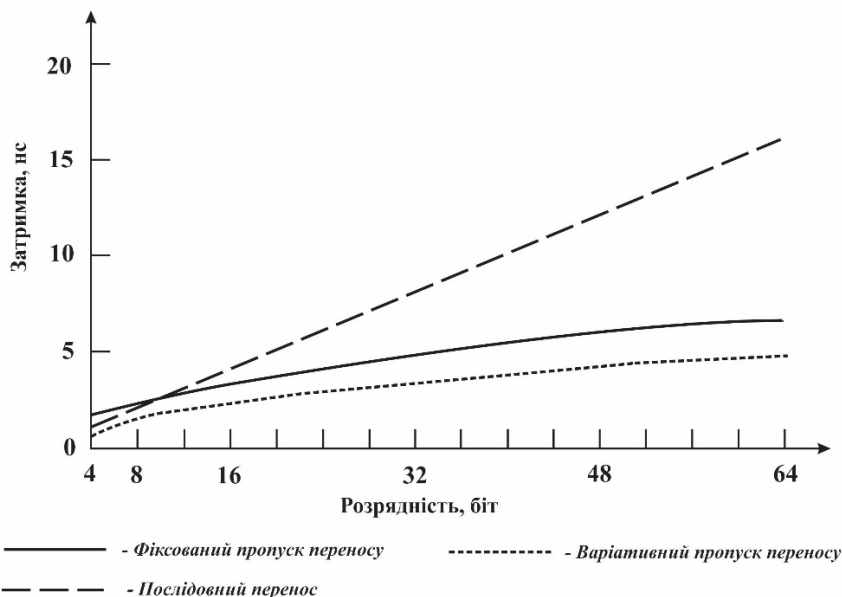


Рис. 13. Залежність затримки сигналу переносу від розрядності суматора для різних типів суматорів.

Використання відкритої платформи Arduino та стандартних компонентів дозволить з часом модернізувати макет, з метою вивчення інших типів DDS. В цілому, макет забезпечує можливість розширення функціоналу, так як на платі Arduino Mega залишилось багато вільних виводів. Наприклад можна розширити можливість переналаштування генератора, підключивши плату розширення Ethernet, або модуль Wi-Fi, та керувати параметрами генератора через локальну мережу або Інтернет.

Проведено аналіз затримки сигналу переносу в наступних схемах суматорів: послідовного переносу, із фіксованим пропуском переносу, із варіативним пропуском переносу. Результати аналізу наведено на рис.13, де показана залежність затримки сигналу переносу від розрядності суматора.

Отже, з точки зору швидкісних показників оптимальним варіантом використання суматора, як основи ядра синтезатора прямого синтезу є суматор із варіативним пропуском переносу.

**Висновки.** Розглянуто основні принципи побудови прямих цифрових синтезаторів. Проаналізовано основні типи суматорів, що застосовуються в ПЦС, наведено їх недоліки та переваги. Наведено аргументи використання суматорів із пропуском переносу зі змінною довжиною блоку для побудови високошвидкісних DDS.

Наведено схему лабораторного макету DDS-генератора на базі ПЛІС. Запропоновано схему системи керування прямим цифровим синтезатором із використанням відкритої апаратно-програмної платформи.

Запропонована схема системи керування генератором дає можливість легко вивчати різні види ПЦС без значної її перебудови та переписування коду. Система може бути основою не тільки для лабораторного макету, а і в перспективі – для побудови повноцінного функціонального генератора сигналів.

### Література

1. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2009. — 384 с., ил.
2. Mou, Z. J., Jutand, F. (1992). Overturned-stairs adder trees and multiplier design. IEEE Trans. Computers, Vol. C-41, August. No. 8, pp. 940–948.
3. Кочемасов В. Цифровые вычислительные синтезаторы – современные решения / В. Кочемасов, Д. Скок, А. Черкашин // Электроника. – 2014. – № 2 (00133).
4. Полікарівських О.І. Застосування нового теоретико-числового базису для побудови високошвидкісних обчислювальних синтезаторів частоти (DDS) / О.І. Полікарівських // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 1.
5. Shuo Li. (2015). Tutorial on designing and simulating a truncation spurs-free direct digital synthesizer (DDS) on a field-programmable gate array (FPGA). University of Illinois at Urbana-Champaign.

### References

1. Dyakonov V. P. Generatsiya i generatoryi signalov / V. P. Dyakonov. — M. : DMK Press, 2009. — 384 s., il.
2. Mou, Z. J., Jutand, F. (1992). Overturned-stairs adder trees and multiplier design. IEEE Trans. Computers, Vol. C-41, August. No. 8, pp. 940–948.
3. Kochemasov V. TSifrovyye vyichislitelnyie sintezatoryi – sovremennyye resheniya / V. Kochemasov, D. Skok, A. Cherkashin // Elektronika. – 2014. – № 2 (00133).
4. Polikarovskyykh O.I. Zastosuvannia novoho teoretyko-chyslovoho bazysu dlia pobudovy vysokoshvydkisnykh obchysliuvalnykh syntezyatoriv chastoty (DDS) / O.I. Polikarovskyykh // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2013. – № 1.
5. Shuo Li: Tutorial is a field-programmable gate array (FPGA) for designing and simulating a truncation spurs-free direct digital synthesizer (DDS). University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.

Рецензія/Peer review : 5.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Підченко С.К.

О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ, А.В. СЛАВІНСЬКИЙ  
Хмельницький національний університет

## МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ СПЕКТРУ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ФАЗОВОГО АКУМУЛЯТОРА

*Розглянуто метод покращення вихідного спектру сигналів цифрових синтезаторів частоти шляхом застосування модифікованого фазового акумулятора, за допомогою якого досягається зменшення періодичної складової у вихідному спектрі прямого цифрового синтезу. Встановлено, проблему виникнення спектральних складових у цифрових синтезаторах частоти. Запропоновано метод боротьби з шумами відсікання фазового слова фазового акумулятора, шуми вихідного сигналу подавляються за допомогою генератора псевдовипадкових послідовностей. Застосування запропонованого модифікованого фазового акумулятора значно знижує рівень фазових шумів.*

*Ключові слова: модифікований фазовий акумулятор, цифровий синтезатор частоти DDS, прямий цифровий синтез частоти ПЦСЧ, шуми фазового акумулятора.*

O.I. POLIKAROVSKYKH, A.V. SLAVINSKIY  
Khmelnyskyi National University

## METHOD FOR IMPROVING THE OUTPUT SPECTRE FOR SIGNALS OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIZERS BY USING THE MODIFIED PHASE ACCUMULATOR

*The main advantages of digital frequency synthesizers, among which are high resolution in frequency and phase, are considered, the extreme fast transition to another frequency or phase. The basic methods of controlling phase and amplitude disturbances in DDS, among which the randomization of output signals, are in the control of the younger grades of pseudorandom sequences, are established. The main sources of noise in digital computers synthesizers were discussed. The proposed structure of the mathematical model to calculate the power spectral density of phase noise, which will allow to analyze noise characteristics as the existing synthesizers and give to predict these characteristics developed in synthesizers. The problem of phase accumulators and the way of suppressing it are established. The method of improving the output signals of digital frequency synthesizers, and significantly reduces the phase noise level. The noise suppression solution that occurs after the operation of rejecting the LSB in a phase accumulator is found. This solution simplifies the implementation of the ROM for digital frequency synthesizers and reduces the power consumption of such ROMs.*

*Key words: modified phase accumulator, digital frequency synthesizer DDS, direct digital synthesis of frequency, phase of accumulator noise.*

### Вступ

Прямі цифрові синтезатори частоти (DDS – Direct Digital Synthesizer) відіграють важливу роль в сучасних цифрових комунікаціях. Прямий цифровий синтез - відносно новий метод синтезу частоти, що з'явився на початку 70-х років минулого століття. Всі описані методи синтезу доступні розробникам вже десятиліття, але тільки останнім часом DDS приділяється пильна увага. Поява дешевих мікросхем з DDS і зручних засобів розробки робить їх сьогодні привабливими для різних сфер застосування [1].

DDS унікальні своєю цифровою визначеністю - генерований ними сигнал синтезується з властивою цифровим системам точністю. Частота, амплітуда і фаза сигналу в будь-який момент часу точно відомі і підконтрольні. DDS практично не схильні до температурного дрейфу і старіння. Єдиним елементом, який володіє властивою аналоговим схемам нестабільністю, є ЦАП. Високі технічні характеристики стали причиною того, що останнім часом DDS витісняють звичайні аналогові синтезатори частот. Виділимо основні переваги цифрових синтезаторів:

- висока роздільна здатність по частоті і фазі, управління якими здійснюється в цифровому вигляді;
- швидкий перехід до іншої частоти (або фази), перебудова за частотою без розриву фази, без викидів і інших аномалій, пов'язаних з часом встановлення;
- архітектура, заснована на DDS, зважаючи на дуже малий крок перебудови по частоті, виключає необхідність застосування точного підстроювання опорної частоти, а також забезпечує можливість параметричної температурної компенсації [2].

Проте існує ряд проблем, які притаманні цифровим синтезаторам частоти прямого цифрового синтезу. Серед проблем можна виділити високе енергоспоживання фазових акумуляторів частоти, блоків ЦАП і ПЗП, а також не можна не згадати проблему шумів, які виникають на всіх етапах синтезу частоти. Одним з основних функціональних блоків синтезатора є фазовий акумулятор. Однією з проблем такого акумулятора є операція відсікання молодших біт, та подавлення шумів які виникають внаслідок цього. Отже необхідно шукати рішення яке продавило б шуми які виникають та спростило реалізацію ПЗП для цифрових синтезаторів частоти прямого методу синтезу.

**Пропонований метод**

Розглянемо джерела шумів які впливають на роботу цифрового синтезатора частоти (рис. 1). В цифрових синтезаторах частоти (ЦСЧ) існують свої шуми, які притаманні тільки їм. Як правило, в цифрових синтезаторах виділяють шість джерел шуму, що символічно зображені на (рис. 1). Цими джерелами є:  $e_p$  – операція відсікання адреси перед перетворювачем фаза-амплітуда (постійна пам'ять із записом відліків функції синуса),  $e_{смис}$  – спотворення від стиснення синусоїдальної функції у постійній пам'яті,  $e_A$  – точність збереження амплітуди функції синуса, що зберігається у постійному запам'ятовуючому пристрої,  $n_{clk}$  – фазовий шум тактової частоти,  $\Delta f$  – похибка встановлення частоти.

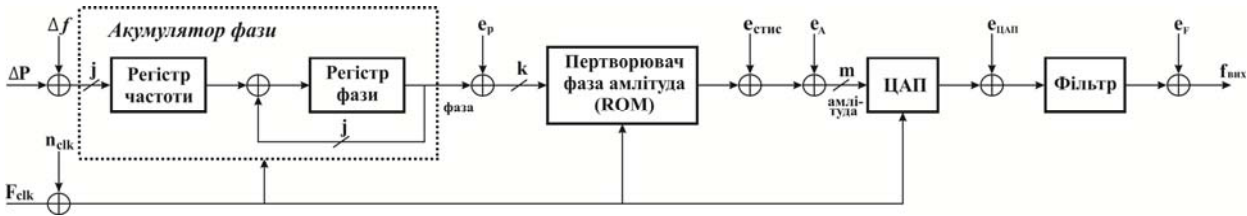


Рис. 1. Структурна схема DDS з джерелами виникнення шумів

Основним джерелом похибок синтезу є ефект виникнення спотворення синтезованого сигналу в процесі відкидання молодших розрядів регістру фази, тобто перетворення  $j$ -розрядного слова у  $k$ -розрядне.

Методи зниження рівня фазових шумів в основному зводяться до оптимізації шумових характеристик окремих вузлів і проектуванню системи, в якій синтез частоти супроводжується найменшим зростанням рівня шумів.

В основі пропонованого методу лежить принцип, згідно з яким, до фазової адреси додається рівномірно розподілена випадкова величина  $z_p(n)$  (джерело цифрового згладжування 1 на рис. 2). В такому випадку, цифрова послідовність ЦСЧ:

$$x(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^j} [P(n) + \varepsilon(n)]\right), \tag{1}$$

де  $P(n)$  – значення фазового регістру. Сумарний адитивний фазовий шум:

$$\varepsilon(n) = e_\phi(n) + z_p(n), \tag{2}$$

де помилка фазового відсікання змінюється періодично як

$$e_\phi(n) = [P(n)] \bmod 2^{j-k}, \tag{3}$$

коли найбільший спільний дільник (НСД),  $\text{НСД}(\Delta P, 2^{j-k}) < 2^{j-k}$ , а період помилки фазового відсікання  $M$  знаходиться як:

$$M = \frac{2^{j-k}}{\text{НСД}(\Delta P, 2^{j-k})}. \tag{4}$$

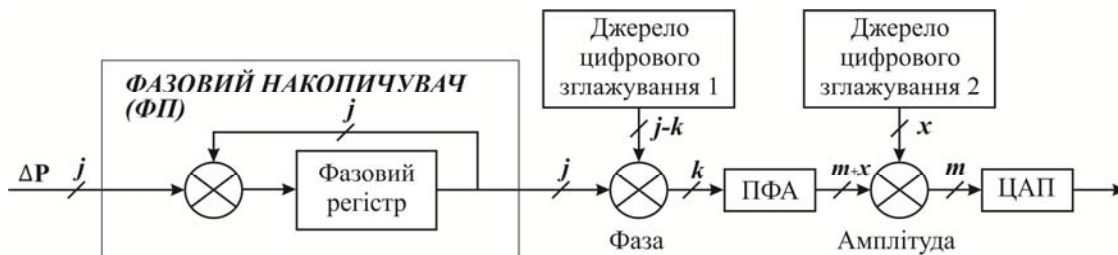


Рис. 2. Структурна схема роботи ЦСЧ з джерелами цифрових згладжувань

Використаємо наближення малого кута

$$x(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^j} P(n)\right) + \frac{2\pi}{2^j} \varepsilon(n) \cos\left(\frac{2\pi}{2^j} P(n)\right) + O\{[\max(\varepsilon(n))]^2\}, \tag{5}$$

де  $\max(\varepsilon(n)) = 2^{-k}$ . Число біт  $k$  повинне бути достатньо великим, щоб задовольнити вимогу малого кута, як правило,  $k \geq 4$ .

Сумарний флуктуаційний шум фази буде пропорціональний  $\varepsilon_\phi(n)$  якщо випадкове значення  $z_p(n)$  додається до фазової адреси перед відсіканням до  $k$  біт, як зображено на (рис. 3).

Рівномірно розподілена випадкова величина  $z_p(n)$  змінюється в діапазоні  $[0; 2^{j-k}]$ . Якщо  $z_p(n)$  менше ніж  $2^{j-k} - e_\phi(n)$ , то  $e_\phi(n) + z_p(n)$  буде відсікатись до 0. Сумарний шум відсікання фази:

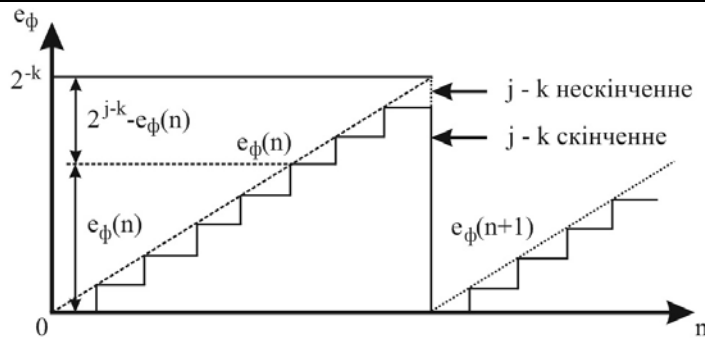


Рис. 3. Додавання біт фази

$$\varepsilon_{\phi}(n) = -e_{\phi}(n), \tag{6}$$

причому імовірність його появи складає

$$\frac{2^{j-k} - e_{\phi}(n)}{2^{j-k}}, \tag{7}$$

тому що є  $(2^{j-k} - e_{\phi}(n))$  значень  $z_p(n)$  менших, ніж  $(2^{j-k} - e_{\phi}(n))$ , а всього  $2^{j-k}$  значень  $z_p(n)$ . Якщо  $z_p(n)$  рівна або більша  $2^{j-k} - e_{\phi}(n)$ , то  $e_{\phi}(n) + z_p(n)$  буде відсікатись до  $2^{j-k}$ . Сумарний шум відсікання фази буде складати:

$$\varepsilon_{\phi}(n) = 2^{j-k} - e_{\phi}(n), \tag{8}$$

з імовірністю появи:

$$\frac{e_{\phi}(n)}{2^{j-k}}, \tag{9}$$

тому що є  $e_{\phi}(n)$  значень  $z_p(n)$  рівних або більше  $2^{j-k} - e_{\phi}(n)$ .

Сумарне значення шуму відсікання фази по  $n$  відлікам дорівнює нулеві:

$$E\{\varepsilon(n)\} = -e_{\phi}(n) \frac{2^{j-k} - e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} + (2^{j-k} - e_{\phi}(n)) \cdot \frac{e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} = 0 \tag{10}$$

Дисперсія повного шуму відсікання фази:

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon^2(n)\} &= e_{\phi}^2(n) \frac{2^{j-k} - e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} + (2^{j-k} - e_{\phi}(n))^2 \cdot \frac{e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} = \\ &= 2^{j-k} e_{\phi}(n) - e_{\phi}^2(n) = 2^{2(j-k)} \left[ \frac{e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} - \left( \frac{e_{\phi}(n)}{2^{j-k}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \tag{11}$$

В залежності від періоду фазової помилки  $M$  середнє значення другого моменту (потужність повного шуму відсікання біт) досягає двох границь. В першому випадку НСД  $(\Delta P, 2^{j-k}) = 2^{j-k-1}$ , а  $M = 2$ , і середнє значення послідовності (11) досягає мінімального значення, відмінного від нуля. Послідовність помилок шуму відсікання фази в відповідності до (3) є  $0, 2^{j-k-1}, 0, 2^{j-k-1}, 0, 2^{j-k-1}, \dots$ . Тоді послідовність (11) має вигляд:

$$E\{\varepsilon^2(n)\} = 0 + \frac{2^{2(j-k)}}{4} + 0 + \frac{2^{2(j-k)}}{4} + 0 + \frac{2^{2(j-k)}}{4} + \dots \tag{12}$$

Середнє значення цієї послідовності:

$$Avg(E\{\varepsilon^2\}) = \frac{2^{2(j-k)}}{8}. \tag{13}$$

В другому випадку НСД  $(\Delta P, 2^{j-k}) = 1$ , а  $M = 2^{j-k}$  і середнє значення послідовності (11) досягає максимального значення. В цьому випадку послідовність помилок відсікання фази приймає всі можливі помилкові значення  $([0, 2^{j-k}])$  перед будь-яким повторенням. Тоді середнє значення послідовності (11) складе

$$Avg(E\{\varepsilon^2\}) = \frac{2^{2(j-k)}}{6}, \tag{14}$$

де  $j \gg k$ .

Інформація про розташування і рівні побічних складових, а також про потужність шуму в спектрі  $x(n)$  виходить на основі функції автокореляції (АКФ):

$$E\{x(n)x(n+m)\} = \sin\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n)\right)\sin\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n+m)\right) + \frac{4\pi}{2^{2j}}\cos\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n)\right)\cos\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n+m)\right)E\{\varepsilon(n)\varepsilon(n+m)\} + O(2^{-4k}). \quad (15)$$

Середнє значення АКФ знаходиться розподілений у часі і знаходиться як:

$$\bar{R}_{xx}[m] \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi^2}{2^{2j}} \bar{R}_{ee}[m] \right] \cos\left(\frac{2\pi}{2^j}P(m)\right), \quad (16)$$

де  $\bar{R}_{ee}[m] = \text{Avg}_n(E\{\varepsilon(n)\varepsilon(n+m)\})$  – розподілена в часі автокореляційна функція повного квантового шуму.

Слід пам'ятати, що для будь-якого фіксованого часу  $n$  розподілення імовірності  $\varepsilon(n)$  і функція  $p(n)$  повністю знаходиться сигналом збурення  $z(n)$ . Якщо  $z(n)$  і  $z(n+m)$  незалежні випадкові змінні з затримкою  $m$ , відмінного від нуля то  $\varepsilon(n)$  і  $\varepsilon(n+m)$  так само не залежні для  $m \neq 0$  і, відповідно,  $\varepsilon(n)$  представляється спектральним білим шумом. В цьому випадку автокореляційна функція буде дорівнювати:

$$\bar{R}_{xx}[m] \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi^2}{2^{2j}} \text{Avg}(\varepsilon^2)\delta(m) \right] \cos\left(\frac{2\pi}{2^j}P(m)\right), \quad (17)$$

де  $\delta(m)$  – дельта-функція Кронекера ( $\delta(0) = 1, \delta(m) = 0$ , при  $m \neq 0$ ) (18).

Відношення сигнал/шум (ВСШ) отримаємо з (7) при  $m = 0$ :

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{\frac{4\pi^2}{2^{2j}} \text{Avg}(E\{\varepsilon^2\})}. \quad (19)$$

Верхня межа ВСШ в відповідності до (13):

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left( \frac{2}{\pi^2 2^{-2k}} \right) \approx (6.02k - 6.93) \text{дБ}. \quad (20)$$

Нижня межа ВСШ в відповідності до (14):

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left( \frac{6}{\pi^2 2^{-2k}} \right) \approx (6.02k - 8.18) \text{дБ}. \quad (21)$$

Синусоїда генерується як реальний сигнал, так щоб його потужність була однаково розподілена між негативними та позитивними компонентами частоти. Потужність повного шуму розділяється на  $S$  побічних складових, де  $S$  – число відліків, причому період джерела збурення більше  $S$ . Звідси верхня межа відношення потужностей корисної гармоніки до спектральної густини потужності шуму:

$$\frac{S}{N} = (6.02k - 9.94 + 10 \log_{10} S) \text{дБн}, \quad (22)$$

досягається, коли НСД ( $\Delta P, 2^{j-k} = 2^{j-k-1}$ ). Нижня межа:

$$\frac{S}{N} = (6.02k - 11.19 + 10 \log_{10} S) \text{дБн}, \quad (23)$$

досягається, коли  $j \gg k$  і НСД ( $\Delta P, 2^{j-k} = 1$ ) [4].

Аналіз гіршого випадку впливу другого порядку був представлений в [2]. Фазове згладжування забезпечує перехід від нормального подавлення побічних складових  $6 \text{дБ}/\text{bit}$  до  $12 \text{дБ}/\text{bit}$ . Розмір ПЗП ( $2^k m$ ) зв'язаний експоненційно з числом розрядів фази, при технічній реалізації суттєво знижується розмір ПЗП. Недоліком фазового згладжування є високий рівень шумів. Проте потужність шуму рівномірно розподіляється в смузі вибірки, тому ВСШ буде зростати з збільшенням числа відліків в (22) і (23). При фазовому згладжуванні необхідний генератор шуму і змішувач, які роблять схему більш складною. Переповнення фазового адресу внаслідок згладжування не створює проблем, тому що фазовий накопичувач працює за принципом переповнення.

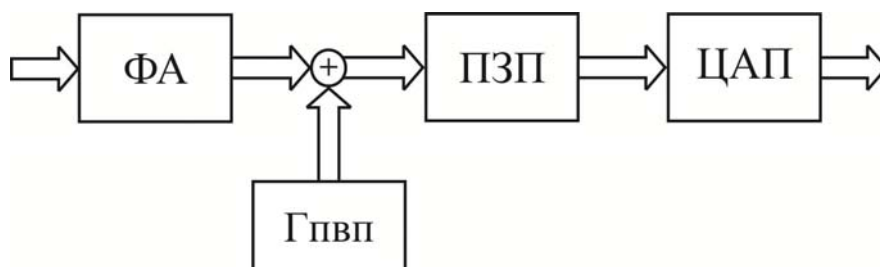


Рис. 4. Структурна схема методу згладжування фазових шумів додаванням ПВП

З регістру фази виходить 24 бітне значення (рис. 4), яке в ПЗП має мати  $2^{24} = 16777216$  відліків, для високошвидкісних ПЗП це складно реалізувати [5]. Тому в фазовому акумуляторі відбувається відсікання молодших біт (LSB), з 24 біт залишається лише 8 старших біт (MSB) які подаються на вхід ПЗП. З восьми старших біт у два молодших розряди подаються сигнали з генератора псевдовипадкових послідовностей (ГПВП). Додавання псевдовипадкової послідовності дозволяє значно знизити рівень фазових шумів. Після відсікання молодших біт в ПЗП залишається не 24 біти, а лише 8 старших біт  $2^8 = 254$ . ПЗП з розрядністю  $2^8$  значно легше та дешевше реалізувати.

### Висновки

Розглянуто метод покращення вихідних сигналів цифрових синтезаторів прямого синтезу шляхом застосування модифікованого фазового акумулятора. Виконано математичний аналіз функціонування модернізованого фазового акумулятора. Розглянуто основні джерела шумів, що виникають у таких синтезаторах. Запропоновані математичні моделі для обрахунку спектральної густини потужності фазових шумів, що дають можливість аналізувати шумові характеристики, як існуючих синтезаторів, так і можливість прогнозувати такі характеристики у розроблюваних синтезаторах. Встановлено, проблему спектральних складових у цифрових синтезаторах частоти, в фазовому акумуляторі, шуми якої подавляються за допомогою генератора псевдовипадкових послідовностей. Застосування запропонованого модифікованого фазового акумулятора спрощує реалізацію цифрових синтезаторів частоти, та значно знижує рівень фазових шумів. Знайдено рішення подавлення шумів, які виникають після операції відкидання молодших біт в фазовому акумуляторі. За допомогою цього рішення спрощується реалізація ПЗП для цифрових синтезаторів частоти та зменшується енергоспоживання таких ПЗП.

### Література

1. Манасевич В. В. Синтезатори частот. Теорія і проектування / Манасевич В. В. ; [пер. з англ. А. С. Галина]. – М. : Зв'язок, 1979.
2. Полікарівських О.І. Джерела шумів та методи зменшення їх періодичної складової / О.І. Полікарівських // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 2. – С. 28.
3. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты / Л. Ридико / Компоненты и технологии. – 2001. – № 7. – С. 1–5.
4. Ромашова Л.В. Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов / Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 1.
5. Ямпурин Н. П. Формування прецизійних частот і сигналів : навчальний посібник / Н. П. Ямпурин, В. В. Болоснев, Е. В. Сафонова, Е. Б. Жалнін. – Нижній Новгород., 2003. – 187 с.

### References

1. Manassevich V.V. Synthesizers of frequencies. Theory and design: Per. from the English A.S. Galina. - Moscow: Connectivity, 1979.
2. Polikarovskiy O.I. Sources of noise and methods of reducing their periodic component. / Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, 2012. № 2, S. 28.
3. Ridiko L. DDS: Direct Digital Frequency Synthesis [Text] / L. Ridiko / Components and Technologies. - 2001.
4. Romashova L.V. Simulation of spectral characteristics of digital computing frequency synthesizers / L.V. Romashova, A.V. Romashov / Design and technology of electronic media. - 2010. - №1.
5. Yampurin N.P. Formation of precision frequencies and signals: Textbook / N.P. Yampurin, V.V. Bolosev, E.V. Safonova, E. B. Zhalnin; Nizhny Novgorod state Those. Nizhny Novgorod, 2003, 187 p.

Рецензія/Peer review : 24.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Підченко С.К.

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, М.В. МАРИНІН  
Хмельницький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

Тенденція розвитку волоконно-оптичних технологій призводить до її детального дослідження для покращення якості зв'язку. В статті проаналізовано поширення оптичних хвиль з різною довжиною у оптичному волокні з певними сплавами матеріалу серцевини і оболонки. Проведено дослідження щодо залежності оптичної ширини смуги багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини. Проведені розрахунки: відношення сигнал/шум, обмежене тепловим та дробовим шумом, при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача; відношення сигнал/шум, обмежене тепловим шумом, при зміні температури навколишнього середовища та ширини смуги пропускання приймача. Визначені значення оптичної потужності приймача за певної ширини смуги пропускання для заданих ймовірностей помилок і зміні температури навколишнього середовища. Розраховано число фотонів, що надходить на приймач при різних швидкостях передачі та заданих ймовірностях помилок.

Ключові слова: оптичне волокно, показник заломлення оптичного волокна, нормована частота, оптична ширина смуги, дисперсія сигналу, дробовий шум, тепловий шум, співвідношення сигнал/шум, швидкість передачі інформації, ймовірність бітових помилок.

V.I. LUZHANSKIY, D.A. MAKARYSHKIN, M.V. MARININ  
Khmelnitsky National University

## RESEARCH OF ENERGY PARAMETERS OF FIBER-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS FOR PROVIDING THE FOLLOWED QUALITY OF CONNECTION

The trend in the development of fiber-optic technologies leads to its detailed study to improve the quality of communication. Today, transport networks in most countries of the world are mainly built on fiber-optic communication lines. More and more are being introduced into communication systems of the technology of processing and communication of the optical wavelength range, the process of transition from cable communication networks to fully optical networks is gradually taking place. The pace of optical technology at all stages of the network requires their research to improve their energy performance. The article analyzes the distribution of optical waves of different lengths in an optical fiber with certain alloys of core material and shell. The research on the dependence of the optical bandwidth of the multimode gradient optical fiber on its length is carried out. Calculations are made: the signal / noise ratio, limited by thermal and fractional noise, when changing the optical power and the width of the receiver bandwidth; the signal / noise ratio, limited by thermal noise, when the ambient temperature changes and the receiver bandwidth is exceeded. The values of the optical power of the receiver are determined at a certain bandwidth for given error probabilities and the change in ambient temperature. The number of photons that arrives at the receiver at different transmission rates and the specified error probabilities is calculated.

Keywords: Optical fiber, refractive index of optical fiber, normalized frequency, optical bandwidth, signal variance, fractional noise, thermal noise, signal/noise ratio, bit rate, bit error probability.

### Вступ

Лінійним трактом волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) називають комплекс технічних засобів волоконно-оптичної системи передачі, який забезпечує передачу цифрової інформації в заданій смузі частот з відповідною швидкістю.

Під *компонентом* волоконно-оптичної системи передачі будемо розуміти виріб оптики або оптоелектроніки, призначений для виконання одної або декількох функцій щодо формування, передавання, розподілу, перетворення та оброблення оптичного сигналу. Насамперед компоненти за принципом дії можна поділити на активні та пасивні. Активні компоненти (модулі) потребують для своєї роботи зовнішнього джерела енергії (живлення), а пасивні – ні.

Волоконно-оптичні системи передачі складаються з активних та пасивних компонентів і пристроїв (модулів), за допомогою яких здійснюється передача інформації. Остання має вид електричного групового (багатоканального) сигналу у цифрових або аналогових системах передачі. Цим електричним сигналом модулюється один з параметрів (амплітуда, частота, фаза, поляризація, інтенсивність) оптичного несучого коливання, що здатне поширюватися у оптичному волокні з малими згасанням і спотворенням форми.

**Формування мети.** Метою роботи є дослідження енергетичних параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення заданої якості зв'язку.

**Результати дослідження.** Каналом передачі є середовище між передавачем і приймачем. У волоконно-оптичних системах зв'язку канал передачі це волокно зі скла або прозорої пластмаси. Один із параметрів оптичного волокна (ОВ) є показники заломлення серцевини та оболонки. За значенням показників заломлення можна судити про щільність східчастих та градієнтних оптичних волокон. Так, різні значення показника заломлення серцевини оптичного волокна і його оболонки говорять про різні щільності цих матеріалів. Це забезпечує основну умову поширення сигналу через оптичне волокно - ефект повного внутрішнього відбиття. У свою чергу, підвищена щільність серцевини оптичного волокна обумовлена додаванням домішок в її склад на етапі виробництва. Проведемо дослідження щодо значень показників заломлення градієнтного оптичного волокна який є ключовими параметрами для волоконної оптики. Вони показують, у скільки разів швидкість поширення світла в оптичному волокні менша, ніж швидкість поширення світла у вакуумі. Показник заломлення кварцового скла може бути розрахований за допомогою апроксимаційної формули Селлмейєра [1]:



$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - L_i^2), \quad (1)$$

де  $A_i$  і  $L_i$  (мкм) – параметри, значення яких залежать від складу скла (коефіцієнти розкладення Селлмейєра);  $\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі (EMX), мкм. Відносна різницю показників заломлення визначаємо за формулою:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1, \quad (2)$$

де  $n_1$  – показник заломлення серцевини;  $n_2$  – показник заломлення оболонки.

Іншим важливим параметром, що характеризує волокно і світло, яке поширюється по ньому, є нормована частота  $V$ , що визначається як:

$$V = (\pi 2a / \lambda) n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (3)$$

де  $a$  – радіус серцевини ОВ. Зі значень нормованої частоти ми можемо дізнаємося про режим роботи оптичного волокна.

Оптичні волокна забезпечують передачу оптичного випромінювання на різних довжинах хвиль, мають різні характеристики та виконують різні задачі. Всі оптичні волокна поділяються на дві основні групи: багатомодові MMF (multi mode fiber) і одномодові SMF (single mode fiber).

Багатомодові волокна поділяються на східчасті (step index multi mode fiber) і градієнтні (graded index multi mode fiber). Одномодові волокна поділяються на східчасті одномодові волокна (step index single mode fiber), або стандартне волокно SF (standard fiber), на волокна з зміщеною дисперсією DSF (dispersion-shifter single mode fiber), і на волокна з не нулевою зміщеною дисперсією NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber). Якщо по волокну може поширюватися тільки одна мода, то це одномодовий режим, тоді як багато мод – це багатомодовий режим. Багатомодовий або одномодовий характер світла, яке поширюється вздовж волокна, докорінно впливає на дисперсію, а отже, і на пропускну спроможність волокна. З цієї причини одномодові волокна звичайно мають значення параметра  $V < 2.405$  [2]. Значень  $V$ , близьких до 2.405, уникають, щоб мінімізувати можливість поширення більш як однієї моди.

Таблиця 1

## Номенклатура мод низьких порядків

Нормована частота, $V$	0-2.405	2.405-3.832	3.832-5.136	5.136-5.52	5.52-6.38	6.38-7.02	7.02-7.59	7.59-8.42
Число мод, $N_m$	1	4	7	9	12	14	17	19

Проведемо розрахунки нормованої частоти для скляних заготовок (преформ) серцевини -  $13,5\%GeO_2, 86,5\%SiO_2$ ;  $4,1\%GeO_2, 95,9\%SiO_2$ ;  $13,5\%B_2O_2, 86,5\%SiO_2$ ;  $7,9\%GeO_2, 92,1\%SiO_2$ ;  $9,1\%P_2O_5, 90,9\%SiO_2$ ;  $16,9\%Na_2O, 32,5\%B_2O_2, 50,6\%SiO_2$ ; під час розробки градієнтного оптичного волокна типу кварц/кварц з різними сплавами і діаметром серцевин та оболонкою ( $100\%SiO_2$ ). Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

## Визначення значень нормованої частоти в залежності від складу скляних заготовок серцевини, її діаметра та довжини електромагнітної хвилі

$\lambda$	$2a$ , мкм	$13,5\%GeO_2, 86,5\%SiO_2$	$4,1\%GeO_2, 95,9\%SiO_2$	$13,5\%B_2O_2, 86,5\%SiO_2$	$7,9\%GeO_2, 92,1\%SiO_2$	$9,1\%P_2O_5, 90,9\%SiO_2$	$16,9\%Na_2O, 32,5\%B_2O_2, 50,6\%SiO_2$
		Значення нормованої частоти					
0,85мкм	8	-185.35	4.02	4.3	4.28	4.77	39.44
	50	-1158.49	25.12	26.89	26.8	29.85	246.54
	62,5	-1448.11	31.40	33.62	33.51	37.31	308.11
	85	-1969.44	42.71	45.72	45.57	50.74	419.13
	100	-2316.98	50.25	53.79	53.61	59.70	439.09
1,3мкм	8	54.51	2.60	-1.27	3.65	4.05	8.5
	50	370.74	16.29	-7.92	22.82	25.32	53.18
	62,5	425.93	20.36	-9.95	28.53	31.65	66.47
	85	579.27	27.70	-13.54	38.80	43.04	90.4
	100	681.49	32.59	-15.93	45.65	50.64	106.36
1,55мкм	8	10.46	2.18	1.18	3.05	3.38	7.10
	50	65.41	13.68	7.41	19.11	21.14	44.41
	62,5	81.76	17.1	9.26	23.89	26.42	55.51
	85	111.2	23.26	12.6	32.49	35.94	75.49
	100	130.82	27.36	14.83	38.22	42.28	88.82

Але недостатньо знати режим роботи ОВ, якщо невідомий час поширення хвиль по ньому. Взагалі час поширення залежить від частоти світла і від відстані, пройдені світлом. Звичайно, сигнал передається по волокну за допомогою групи оптичних частот, що випромінюються джерелом. Потужність світла переноситься окремими променями, які йдуть по різним траєкторіям, що призводить до спотворення передавального сигналу.

У цифровій системі це спотворення виглядає як розширення і змінювання форми імпульсів. Розширення наростає зі збільшенням відстані поширення. Зрештою, розширення стає настільки великим, що суміжні імпульси починають накладатися один на одного, і окремі інформаційні біти перестають відрізнитися, що призводить до виникнення помилок. Щоб запобігти цьому, імпульси мають передаватися з меншою частотою слідування, що обмежує швидкість передачі імпульсів. Залежність швидкості поширення хвилі від частоти світла і від шляху поширення призводить до обмеження швидкості передачі інформації [3].

Вважається, що розширення імпульсу відбувається лінійно з довжиною оптичного волокна. Разом з тим, експерименти з багатомодовими волокнами показали, що це вірно лише для коротких довжин ( $L$ ) оптичних волокон ( $L \leq 1$  км). Для більш довгих волокон ( $L > 1$  км) розширення імпульсу зростає не так швидко. Замість лінійної залежності тут існує залежність, що пропорційна кореню квадратному довжини оптичного волокна (рисунок 1 пояснює цю відмінність). Залежність розширення імпульсу пропорційна кореню квадратному від довжини ОВ, яка виникає внаслідок перемішування мод. На короткій ділянці оптичного волокна ( $L \leq 1$  км) обмін потужністю між модами ще не є закінчений. Після поширення оптичного променя на велику відстань досягається рівноважний розподіл потужності між модами. Перемішування продовжується, але потужність у будь-якій моді залишається тією самою. У цьому стані розширення оптичного імпульсу  $\approx \sqrt{L}$ . Довжина, за якої досягається рівновага, називається довжиною рівноважного стану  $L_p$ . Значення  $L_p$  залежить від конкретного волокна. На рисунку 1 значення рівноважного стану дорівнює 1 км. У загальному випадку можна записати вираз для модового розширення імпульсу:

$$\Delta\tau = L\Delta(\tau/L) \text{ для } L \leq L_p, \tag{4}$$

$$\Delta\tau = \sqrt{LL_p}\Delta(\tau/L) \text{ для } L > L_p, \tag{5}$$

де  $\Delta\tau$  – модове розширення імпульсу;  $L$  – довжина ОВ;  $\Delta(\tau/L)$  – розширення імпульсу на одиницю довжини в лінійній області;  $L_p$  – довжина рівноважного стану.

Якісне волокно має слабкий ефект перемішування мод, так що рівноважний стан встановлюється тільки після поширення імпульсу на досить велику відстань. Волокно без ефекту змішування мод мало б нескінченно велике значення й розширення імпульсу збільшувалося б лінійно з його довжиною. У маломодових волокнах змішується мала кількість мод (внаслідок розсіювання, мікронеоднорідностей і неоднорідностей). Для цього волокна значення  $L_p$  є відносно невеликим. Хоча маломодове волокно є більш ширококутовим, його згасання буде вище, ніж у багатомодових волокон. Як приклад припустимо, що модові спотворення настільки великі, що дисперсією можна знехтувати. При використанні формул (4 і 5), а потім виразу  $f_{-3\text{дБ}} = (2\Delta\tau)^{-1}$  отримуємо, що оптична ширина смуги:

$$f_{-3\text{дБ}} = 1/2L\Delta(\tau/L) \text{ для } L \leq L_p, \tag{6}$$

$$f_{-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{LL_p}\Delta(\tau/L)] \text{ для } L > L_p. \tag{7}$$

Хотілося би зауважити, що більшість виробників у специфікації оптичного волокна здебільшого вказують параметр "добуток частоти на довжину", ніж "розширення імпульсу на одиницю довжини".

Розрахуємо і побудуємо залежність ширини смуги за рівнем -3 дБ від довжини для багатомодового східчастого ОВ із лінійним розширенням імпульсу на одиницю довжини 15 нс/км, 20 нс/км і 50 нс/км, довжиною рівноважного стану 1 км, і довжиною оптичного волокна 10 км. Тоді підставляємо наші значення в формулу (7) і отримуємо значення оптичної ширини смуги;

$$f_{1-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 15] = 10,54 \text{ МГц}; f_{2-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 20] = 7,91 \text{ МГц};$$

$$f_{3-3\text{дБ}} = 1/[2\sqrt{1 \cdot 10} \cdot 50] = 3,16 \text{ МГц}.$$

Для того, щоб побудувати цю залежність, нам потрібно знати, що для довжин менших 1 км використовується рівняння (6), де  $L$  підставляють у км, а для довжин понад 1 км рівняння (7). Результати проведених розрахунків надані в таблиці 3 та побудований графік залежності оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з  $L_p = 1$  км.

Розглянемо основні джерела шуму при прийманні оптичних сигналів. Існує дві фундаментальні причини зниження якості сигналу в процесі його приймання за рахунок наявності дробового шуму в самому оптичному сигналі і теплового (або дробового) шуму у приймальному пристрої.



Рис. 1. Залежність розширення імпульсу від довжини багатомодового оптичного волокна[1]

**Залежність оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з  $L_{\delta} = 1 \text{ км}$**

Розширення імпульсу, нс/км	Довжина оптичного волокна, км									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	10
	Оптично ширина смуги, МГц									
15	166,66	83,33	55,55	41,66	33	23,57	16,66	13,6	11,78	10,54
20	125	62,5	41,66	31,25	25	17,7	12,5	10,2	8,83	7,91
50	50	25	16,66	12,5	10	7,07	5	4,08	3,53	3,16

Тепловий шум виникає в резисторі навантаження  $R_H$  фотоприймача. Електрони в будь-якому резисторі (провіднику) при температурі, відмінній від температури абсолютного нуля, ніколи не залишаються стаціонарними. Внаслідок постачання їм теплової енергії вони безупинно рухаються навіть без прикладання зовнішньої напруги.

Напрямки руху електронів довільні, як і результуючий заряд у кожного з електронів у довільний момент часу. Отже, у резисторі існує струм, сила якого випадково змінюється і його називають *струмом теплового шуму*  $i_{\text{ШТ}}$ .

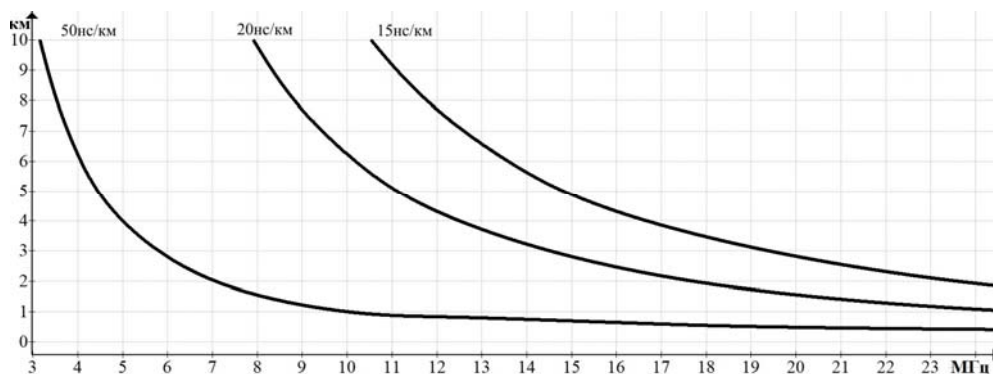


Рис. 2. Залежність оптичної ширини смуги за рівнем -3 дБ багатомодового градієнтного оптичного волокна від його довжини з  $L_p = 1 \text{ км}$

Середнє значення струму дорівнює нулю, а середня потужність шуму, створеного резистором дорівнює:

$$R_H i_{\text{ШТ}}^2, \quad (8)$$

де  $i_{\text{ШТ}}^2$  – середньоквадратичне значення струму теплового шуму;  $R_H$  опір навантаження. Шумовий струм внаслідок  $R_H$  додається до струму сигналу, що створюється фотоприймачем. Шум може бути врахований еквівалентним джерелом струму із середньоквадратичним значенням:

$$i_{\text{ШТ}}^2 = 4kT\Delta f / R_H, \quad (9)$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура, К;  $\Delta f$  – електрична ширина смуги пропускання приймального пристрою, Гц. Звичайно, ширину смуги пропускання приймального пристрою обмежують, щоб мінімізувати шум.

Малощумні приймальні пристрої мають ширину смуги пропускання трохи більшу, ніж ширина смуги інформаційного повідомлення. Іноді потрібне більше значення ширини смуги пропускання приймального пристрою, щоб з'ясувати, що обмежує ширину смуги повідомлення – передавальний пристрій або оптичне волокно.

Дискретна природа потоку електронів породжує флуктуації сигналу, це так званий *дробовий шум*. Відхилення миттєвого значення струму від постійного (ідеального) рівня, що викликані генерацією дискретних носіїв заряду у випадкові моменти часу, називаються *дробовим шумом*. Середньоквадратичне значення струму дробового шуму визначається як:

$$i_{\text{ШД}}^2 = 2qI\Delta f, \quad (10)$$

де  $q$  – заряд електрона;  $I$  – середнє значення фотоструму;  $\Delta f$  – ширина смуги пропускання приймального пристрою. Середня електрична потужність дробового шуму в навантаженні можна визначити за формулою:

$$P_{\text{ШД}} = 2qI_c\Delta f R_H, \quad (11)$$

де  $I_c$  – фотострум сигналу. Потужність теплового шуму в навантаженні при використанні рівняння (10) можна подати у вигляді:

$$P_{\text{шт}} = 4kT\Delta f \quad (12)$$

Обмежене квантовим шумом відношення сигнал/шум можна визначити за формулою:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{i_c}{2q\Delta f}, \quad (13)$$

де  $\frac{C}{\text{Ш}}$  – відношення сигнал/шум.

Якщо потужність світла мала, то звичайно тепловий шум домінує над дробовим шумом, тоді відношення сигнал/шум визначаємо як:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{R_H(\eta qP / h\nu)^2}{4kT\Delta f}, \quad (14)$$

де  $\eta$  – це квантова ефективність, що дорівнює одиниці;  $P$  – оптична потужність що надходить;  $h$  – стала Планка;  $\nu$  – частота випромінювання.

Розглянемо волоконно-оптичну систему передачі, яка складається зі світлодіоду, що випромінює потужність 10 мВт на довжинах хвиль 0,85 мкм, 1,3 мкм, і 1,55 мкм, і  $p-i-n$  – фотодіоду зі струмовим відгуком 0,5 А/Вт. Опір навантаження 50 Ом, ширина смуги пропускання приймального пристрою 10 МГц, 30 МГц, 50 МГц, 70 МГц, 100 МГц, при температурі навколишнього середовища 288 К (15°C), 293 К (20°C), 298 К (25°C), 303К (30°C). Втрати в системі, крім згасання у волокні, дорівнюють 40 дБ, 41 дБ, 42 дБ, 43 дБ, 44 дБ.

Розрахуємо оптичну потужність, яка досягає приймача:  $P_{n1} = 40\text{дБ} = 1\text{мкВт}$ ;  $P_{n2} = 41\text{дБ} = 0,8\text{ мкВт}$ ;  $P_{n3} = 42\text{дБ} = 0,6\text{ мкВт}$ ;  $P_{n4} = 43\text{дБ} = 0,5\text{ мкВт}$ ;  $P_{n5} = 44\text{дБ} = 0,4\text{ мкВт}$ . У цій системі потужність теплового шуму майже на чотири порядки більше, ніж дробового. Параметри системи обмежує тепловий шум, тобто справедлива формула (14). У таблиці 4 наведені відношення сигнал/шум при різній оптичній потужності і ширини смуги пропускання приймача.

Для порівняння обчислимо значення відношення сигнал/шум, обмежене квантовим шумом з рівняння (13) і запишемо ці дані в таблицю 5.

А тепер проаналізуємо, як впливає температура навколишнього середовища на значення сигнал/шум обмеженим тепловим шумом і запишемо отримані дані в таблицю 6.

Шум може призвести до помилок у процесі прийняття рішення, який із двійкових символів (0 або 1) передався. Коефіцієнт помилок по бітах (bit-error rate - BER) є критерієм якості цифрових систем. Так, якщо одна помилка виникає на кожні 100 рішень, то BER = 0,01. З цього випливає, що ймовірність помилки протягом будь-якого тактового інтервалу тільки приблизно дорівнює BER. Отже, якщо BER = 0,01, то ймовірність помилки  $p_{\text{пом}}$  приблизно дорівнює 0,01. Два терміни – коефіцієнт помилок за бітами і ймовірність помилки – є взаємозамінними.

Таблиця 4

**Відношення сигнал/шум обмежене тепловим шумом при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача (T=293К)**

$P_n, \text{мкВт}$	$\Delta f = 10 \text{ МГц}$	$\Delta f = 30 \text{ МГц}$	$\Delta f = 50 \text{ МГц}$	$\Delta f = 70 \text{ МГц}$	$\Delta f = 100 \text{ МГц}$
1	77,63(18,9 дБ)	25,77(14,1 дБ)	15,47(11,9 дБ)	11,06(10,4 дБ)	7,76(8,9 дБ)
0,8	49,68(16,9 дБ)	16,49(12,1 дБ)	9,9(9,9 дБ)	7,06(8,4 дБ)	4,96(6,9 дБ)
0,6	27,95(14,4 дБ)	9,27(9,6 дБ)	5,56(7,4 дБ)	3,97(5,9 дБ)	2,79(4,4 дБ)
0,5	19,32(12,8 дБ)	6,44(8 дБ)	3,86(5,8 дБ)	2,76(4,4 дБ)	1,93(2,8 дБ)
0,4	12,42 (10,9 дБ)	4,12(6,1 дБ)	2,47(3,9 дБ)	1,76(2,4 дБ)	1,24(0,9 дБ)

Таблиця 5

**Відношення сигнал/шум обмежене дробовим шумом при зміні оптичної потужності та ширини смуги пропускання приймача (T=293К)**

$P_n, \text{мкВт}$	$\Delta f = 10 \text{ МГц}$	$\Delta f = 30 \text{ МГц}$	$\Delta f = 50 \text{ МГц}$	$\Delta f = 70 \text{ МГц}$	$\Delta f = 100 \text{ МГц}$
1	156250(51,9 дБ)	52083(47,1 дБ)	31250(44,9 дБ)	22321(43,4 дБ)	15625(41,9 дБ)
0,8	125000(50,9 дБ)	41666(46,1 дБ)	25000(43,9 дБ)	17857(42,5 дБ)	12500(40,9 дБ)
0,6	93750(49,7 дБ)	31250(44,9 дБ)	18750(42,7 дБ)	13392(41,2 дБ)	9375(39,7 дБ)
0,5	78125(48,9 дБ)	26041(44,1 дБ)	15625(41,9 дБ)	11160(40,4 дБ)	7812(38,9 дБ)
0,4	62500 (47,9 дБ)	20833(43,1 дБ)	12500(40,9 дБ)	8928(39,5 дБ)	6250(37,9 дБ)

Можна навести й інше пояснення поняття коефіцієнта помилок по бітах. Неможливо дробити індивідуальний біт, або індивідуальну помилку. Проте, можна розглядати ймовірність помилки  $p_{\text{пом}}$  як число помилок, що припадають на один біт. Для швидкості передачі даних  $R$  (біт/с) число помилок за секунду дорівнює  $p_{\text{пом}}$  (добуток числа бітів за секунду на кількість помилок на біт). Наприклад, якщо

$p_{\text{пом}} = 0,01$  і  $R = 1$  Мбіт/с, тоді виникає 10000 помилок протягом кожної секунди. Таке значення може бути неприпустимо великим на практиці. Зменшення  $p_{\text{пом}}$  до  $10^{-9}$  знизить швидкість появи помилки до 0,001 помилки на секунду, тобто одна помилка буде виникати протягом кожних 1000 с (16,7 хвилини). Коефіцієнт помилок  $10^{-9}$  забезпечує високу якість цифрових систем передачі.

Таблиця 6

**Відношення сигнал/шум обмежене тепловим шумом при зміні температури навколишнього середовища та ширини смуги пропускання приймача при  $R_{\text{п}} = 1$  мкВт**

T, К	$\Delta f = 10$ МГц	$\Delta f = 30$ МГц	$\Delta f = 50$ МГц	$\Delta f = 70$ МГц	$\Delta f = 100$ МГц
288К	79,11 (18,98 дБ)	26,26 (14,19 дБ)	15,74 (11,97 дБ)	11,26 (10,51 дБ)	7,91 (8,98 дБ)
293К	77,63 (18,9 дБ)	25,77 (14,11 дБ)	15,47 (11,89 дБ)	11,06 (10,43 дБ)	7,76 (8,89 дБ)
298К	76,21 (18,82 дБ)	25,35 (14,03 дБ)	15,16 (11,8 дБ)	10,86 (10,35 дБ)	7,62 (8,81 дБ)
303К	75,3 (18,76 дБ)	24,95 (13,97 дБ)	14,95 (11,74 дБ)	10,68 (10,28 дБ)	7,48 (8,73 дБ)

У реальному приймальному пристрої струм шуму випадково може підсумовуватися з корисним струмом, що призводить до того, що миттєве значення результуючого струму (у деякі моменти часу) стане нижче порогового рівня. При цьому також виникає помилка. Зрозуміло, що поріг не може бути занадто близьким до нуля; це збільшило б число помилок при виявленні нулів. Він також не може бути занадто близьким до ідеального рівня  $i_c$ , оскільки зростуть помилки виявлення одиниць. Як і слід було очікувати, пороговий рівень, що забезпечує найменшу кількість помилок, дорівнює половині значення струму, що виникає при надходженні одиниці.

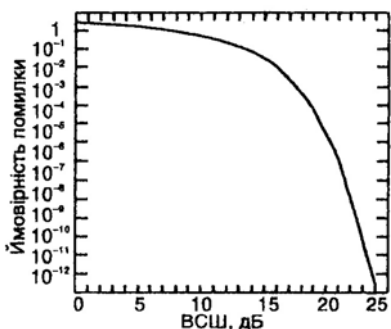


Рис. 3. Залежність ймовірності помилки від значення відношення сигнал/шум для системи, обмеженої тепловим шумом

Значення порогового струму приймають рівним  $0,5i_c$ . Це оптимальне значення порогового рівня справедливе для рівноймовірної появи нулів і одиниць на сусідніх тактових інтервалах, що виконується для більшості передаваних повідомлень. Якщо рівень потужності, що приймається, наприклад зменшується внаслідок старіння джерела світла та оптичного волокна, то і поріг рішення також має знижуватися.

Розглянемо цифрову лінію передачі, що працює зі швидкостями  $R_1 = 1$  Мбіт/с,  $R_2 = 10$  Мбіт/с,  $R_3 = 50$  Мбіт/с,  $R_4 = 100$  Мбіт/с, використовуючи опір навантаження приймача 100 Ом при температурі 293К. Довжина хвилі дорівнює 0,82 мкм, при коефіцієнтах помилок  $10^{-4}; 10^{-5}; 10^{-6}; 10^{-7}$ . Використовується p-i-n фотодіод із квантовою ефективністю, що дорівнює одиниці.

Із рисунка 3 знаходимо ймовірність помилок при заданому відношенні сигнал/шум.

Тоді отримуємо для  $BER = 10^{-4}$  потрібно  $\frac{C}{\text{Ш}} = 17,5$ ;  $BER = 10^{-5}$  потрібно  $\frac{C}{\text{Ш}} = 19$ ;  $BER = 10^{-6}$  потрібно  $\frac{C}{\text{Ш}} = 20,5$ ;  $BER = 10^{-7}$  потрібно  $\frac{C}{\text{Ш}} = 21,5$ .

Рішення рівняння (14), відносно оптичної потужності, що надходить, дає нове рівняння:

$$P = \frac{h\nu}{\eta q} \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_{\text{п}}} \sqrt{\frac{C}{\text{Ш}}}}, \tag{15}$$

де оптична частота  $\nu = c / \lambda = 3.66 \cdot 10^{14}$  Гц і тривалість імпульсу  $\tau = 10^{-6}$  с. При цьому розрахуємо оптичну потужність і для різного значення температури навколишнього середовища і запишемо це у таблицю 7.

Таблиця 7

**Оптична потужність приймального пристрою при ширині смуги пропускання 1МГц при заданих ймовірностях помилок і зміні температури навколишнього середовища**

T, К	$BER = 10^{-4}$	$BER = 10^{-5}$	$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-7}$
288	$1.43 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.7 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.02 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.27 \cdot 10^{-7}$ Вт
293	$1.44 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.71 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.04 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.29 \cdot 10^{-7}$ Вт
298	$1.45 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.73 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.05 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.3 \cdot 10^{-7}$ Вт
303	$1.47 \cdot 10^{-7}$ Вт	$1.74 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.07 \cdot 10^{-7}$ Вт	$2.32 \cdot 10^{-7}$ Вт

Число фотонів, що надходять на приймач за одну секунду, дорівнює  $P / h\nu$ . Отже, число фотонів, що

надходять за проміжок часу, який дорівнює одному тактовому інтервалу  $\tau$  становить:

$$n_{\phi} = (P / hv)\tau. \quad (16)$$

Підставляючи числа у формулу (16), дістаємо, яка потрібна кількість фотонів в системі, обмеженій тепловим шумом для певного  $BER$  і запишемо отримані значення в таблицю 8.

Таблиця 8

**Число фотонів, які надходять на приймач за проміжок часу 1с при різних швидкостях передачі та заданих ймовірностях помилок при  $T = 293K$**

Швидкість передачі, Мбіт/с	$BER = 10^{-4}$	$BER = 10^{-5}$	$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-7}$
1	$5,93 \cdot 10^5$	$7,04 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^5$	$9,43 \cdot 10^5$
10	$1,88 \cdot 10^6$	$2,23 \cdot 10^6$	$2,65 \cdot 10^6$	$2,98 \cdot 10^6$
50	$4,2 \cdot 10^6$	$4,98 \cdot 10^6$	$5,93 \cdot 10^6$	$6,63 \cdot 10^6$
100	$5,93 \cdot 10^6$	$7,04 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^6$	$9,43 \cdot 10^6$

### Висновки

1. На довжині електромагнітної хвилі  $\lambda = 0,85\mu\text{м}$  немає оптичних волокон, які б працювали в одномодовому режимі.

2. В одномодовому режимі може працювати тільки два оптичних волокна, серцевини яких складаються з  $4,1\%GeO_2, 95,9\%SiO_2$  ( $V = 2,18$ );  $13,5\%B_2O_3, 86,5\%SiO_2$  ( $V = 1,18$ ); на довжині електромагнітної хвилі,  $\lambda = 1.55\mu\text{м}$ .

3. Оптичні волокна зі складом серцевини  $13,5\%GeO_2, 86,5\%SiO_2$  на довжині  $\lambda = 0,85\mu\text{м}$  і;  $13,5\%B_2O_3, 86,5\%SiO_2$  на довжині  $\lambda = 1,3\mu\text{м}$ ; не зможуть передавати електромагнітну хвилю тому, що неможливо поширювати світло в оптичному волокні, так як не буде повного внутрішнього відбиття (нормована частота приймає від'ємні значення).

4. З рисунку 2 видно, що при використанні оптичних волокон з довжиною більшою, ніж довжина рівноважного стану ( $L_p = 1\text{км}$ ), внесок модового розширення імпульсу збільшується, як корінь квадратний від довжини оптичного волокна, а внесок дисперсії в розширення імпульсу збільшується пропорційно довжині оптичного волокна. Розширення імпульсу в  $20\text{нс/км}$  при збільшенні довжини оптичного волокна в 5 раз (наприклад з 2 км до 10 км) оптична ширина смуги за рівнем  $-3\text{дБ}$  багатомодового градієнтного оптичного волокна зменшиться з  $17.7\text{МГц}$  до  $7.91\text{МГц}$  (на  $44,7\%$ ).

5. Відношення сигнал/шум обмежений тепловим шумом (при  $T=293\text{К}$ ) не повинен бути меншим порогового значення  $6\text{дБ}$  ( $3.98$  раз). При оптичній потужності приймача  $0,4\text{мкВт}$ ,  $0,5\text{мкВт}$  максимальна смуга його пропускання може складати не більше  $30\text{МГц}$ ; для  $0,6\text{мкВт}$  – не більше  $50\text{МГц}$ ; для  $0,8\text{мкВт}$  і  $1\text{мкВт}$  – не більше  $100\text{МГц}$ .

6. При швидкості передачі інформації  $1\text{Мбіт/с}$  для зменшення ймовірності помилок з  $BER = 10^{-4}$  до  $BER = 10^{-7}$  необхідно збільшити число фотонів на  $59\%$ . При збільшенні швидкості передачі з  $1\text{Мбіт/с}$  до  $100\text{Мбіт/с}$  необхідно збільшити кількість фотонів в  $10$  разів для забезпечення заданої ймовірності помилок  $BER = 10^{-7}$ .

### Література

1. Корнійчук В. І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / [В. І. Корнійчук., П. Д. Мосорін]. – ОДЕСА : Друк, 2001. – 362 с.
2. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку / В. Б. Каток. – Київ, 1999. – 483 с.
3. Склярів О. К. Волоконно-оптичні мережі та системи зв'язку / Склярів О. К. – Москва : САЛОН-Пресс, 2004. – 261 с. – (Серія «Бібліотека інженера»).
4. Горященко К.Л. Впровадження стандарту IEEE 1901 передачі інформації по провідних лініях / К.Л. Горященко, В.П. Нездоровін, В.С. Коваль // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 242-245.

### References

1. Korniiichuk V. I. Volokonno-optychni komponenty, systemy peredachi ta merezhi / [V. I. Korniiichuk., P. D. Mosorin]. – ODESA : Druk, 2001. – 362 s.
2. Katok V. B. Volokonno-optychni systemy zviazku / V. B. Katok. – Kyiv, 1999. – 483 s.
3. Sklyarov O. K. Volokonno-opticheskie seti i systemy svyazi / Sklyarov O. K. – Moskva : SALON-Press, 2004. – 261 s. – (Seriya «Biblioteka inzhenera»).
4. Horyaschenko K.L. V.P. Nezdorovin, V.S. Koval. Implementation of IEEE 1901 for data transfer over powerlines. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2017. Issue 3. P. 242-245

Рецензія/Peer review : 2.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

## СЕГМЕНТАЦІЯ ТА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ АУДІО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ПРИХОВАНОЇ МАРКІВСЬКОЇ МОДЕЛІ

Аналіз аудіо сигналу є одним з важливих завдань з огляду на постійно зростаючі об'єми аудіо та відео інформації. Стаття присвячена задачі сегментації та кластеризації аудіо сигналу. Сегментація аудіо сигналу передбачає визначення границь, на яких змінюються характеристики, та виділення однорідних ділянок. Багато існуючий методів ґрунтуються на детектуванні точок зміни характеристик для пошуку границь сегментів. В статті розглядається об'єднаний підхід до сегментації і кластеризації, що ґрунтується на підході без вчителя в моделях послідовних даних. Приховані харківські моделі є вдалим вибором для моделювання аудіо сигналу, що представляє собою послідовність даних. В статті досліджено метод сегментації та кластеризації на основі такого типу моделей. Представлено існуючий ітеративний EM алгоритм (Expectation-maximization algorithm) для прихованих моделей Маркова та розширення методу для напівприхованих моделей Маркова та їх застосування до моделювання аудіо сигналу його сегментації та кластеризації. В запропонованому методі кожний прихований стан харківської моделі відображає кластер сегментів. Початково модель ініціалізується з завідомо більшою кількістю кластерів, ніж існує за апіорною оцінкою, з метою зменшення ймовірності потрапляння неоднорідних сегментів в один кластер. Сегментація виконується з використанням алгоритму Вітербі в кожному кластері. Наступним кроком є зменшення числа кластерів шляхом їх об'єднання. Кластери об'єднуються відповідно до відношення правдоподібності. Новий клас представляється новою моделлю, параметри якої формуються за EM алгоритмом. Сегментація переоцінюється з новою топологією прихованої харківської моделі, яка містить на один кластер менше ніж попередня. Процес ітеративно повторюється до досягнення максимуму оціночної функції. В статті представлені результати експерименту сегментації та кластеризації аудіо сигналу з різним типом змісту з неоднорідними ділянками.

Ключові слова: моделі Маркова, апостеріорна ймовірність, алгоритм Вітербі, послідовність прихованих станів.

A. KASHTALIAN  
Khmelnitsky National University

### AUDIO SIGNAL SEGMENTATION AND CLUSTERING BASED ON HIDDEN MARKOV MODEL

The audio signal analysis is important task in the condition of continuous growing amount of audio and video information. The article is devoted to the issue of audio signals segmentation and clustering task. Audio signal segmentation means the definitions of borders, on which characteristics are being changed, and homogenous segments allocation. Many existent methods are based on change points detection for segment bounds search. The join approach of simultaneous segmentation and clustering is considered in the article. It is based on a unsupervised learning approach in sequential data models. Hidden Markov models is a successful choice for audio signal modeling because it represents data sequence. The segmentation and clusterization method based on such type of models is investigated. The existent iterative EM algorithm (Expectation-maximization) for hidden Markov models and expanded method for semi-hidden Markov modes and their application to audio signal modeling, segmentation and clustering are presented. Every hidden state of Markov model reflects segments cluster in the proposed method. Initially the model is initialized with notoriously bigger number of clusters than exists by aprioristic estimate with the purpose to reduce the probability of allocation of non-homogeneous segments in one cluster. The segmentation is performed with using of Viterbi algorithm for every cluster. The next step is reducing of the cluster number by the way of joining them. Clusters are joined in order to likelihood-ratio value. A new class represents by the new model, which parameters are formed with EM algorithm. Segmentation is re-estimated with new hidden Markov topology, which contains one less cluster than previous one. The process repeats iteratively to reach the maximum of estimate function. The experiment results of segmentation and clustering are presented in the article, the audio signals have different content type with non-homogenous chunks.

Key words: Markov models, posterior probability, Viterbi algorithm, hidden states sequence.

**Вступ.** Розпізнавання паттернів в аудіо сигналі є складним завданням із широким спектром застосувань, таких як аналіз відео та аудіо потоків, встановлення меж речень, аналіз діалогів та відокремлення джерел сигналу. Сегментація аудіо сигналу має на меті розбиття аудіо потоку на однорідні сегменти, що є корисним при обробці значних об'ємів інформації. Однією з таких задач є сегментація та кластеризація аудіо сигналу відповідно до спікера, в ідеалі кожний сегмент має містити мовлення тільки одного спікера [1]. Кластеризація аудіо сигналу є випадком класифікації без вчителя сегментів мовлення, що ґрунтується на частотних характеристиках [2]. Серед розроблених методів кластеризації є ієрархічні та агломеративні методи, метод k-середніх та самоорганізуючі карти [3, 4]. Кластеризації спікерів може передувати сегментація аудіо, однак це може призвести до збільшення похибки кластеризації. Сегментація та кластеризація аудіо сигналу може бути оптимізована в одному процесі [5]. Процес сегментації та послідовної чи паралельної кластеризації називають діаризацією. Діаризація – це процес автоматичного розділення аудіо потоку на окремі однорідні сегменти, та встановлення відповідності між джерелами та сегментами мовлення, що дає можливість дати відповідь на питання «хто де говорить». Якщо говорити про сегментацію за джерелами мовлення, то процес діаризації охоплює верифікацію спікерів та ідентифікацію спікерів [6].

Постановка задачі. В багатьох випадках задача сегментації розглядається як задача класифікації з вчителем, коли певні сегменти і точки зміни сегментів розмічають і використовують для подальшого навчання класифікатора. Та це робить алгоритм надзвичайно залежним від наявних розмічених зразків, і може ускладнювати адаптацію до нових аудіо потоків. Тому важливо сфокусуватися на підходах, які використовують навчання без вчителя для аудіо сегментації, що дозволяє уникнути потреби в розмічених

даних, і ґрунтуватися на властивостях моделі для коректної сегментації та кластеризації сегментів. Це можливо, якщо не відокремлювати процес пошуку точок зміни спікерів та пошуку схожих сегментів, а натомість об'єднати їх. Природним в цьому випадку є використання прихованих харківських моделей, які є потужним інструментом моделювання послідовностей. Відомо, що безперервне навчання є ефективним шляхом вдосконалення результатів навчання, особливо для великих потоків аудіо даних.

Важливим для сегментації та кластеризації є представлення аудіо сигналу. Аудіо сигнал  $x_a(t)$  часто описується частотним представленням, зокрема віконним перетворенням Фур'є:

Важливим для сегментації та кластеризації є представлення аудіо сигналу. Аудіо сигнал  $x_a(t)$  часто описується частотним представленням, зокрема віконним перетворенням Фур'є:

$$x(t, e^{i\omega}) = \sum_{u=-\infty}^{+\infty} x[u]g[u-t]e^{-i\omega u},$$

де  $g[u-t]$  – деяка віконна функція (вікно Гаусса, вікно Хеммінга, вікно Хеннінга), кожне  $x(t, e^{i\omega})$  для фіксованого  $t$  може бути отримане дискретним перетворенням Фур'є сигналу  $u \rightarrow x[u]g[u-t]$  в часову вікні з центром  $t$ , отже є фіксована кількість  $p$  коефіцієнтів  $x_{t,1}, \dots, x_{t,p} \in C$ .

Надалі розглядаємо аудіо сигнал представлений модулем коефіцієнтів віконного перетворення Фур'є: де  $x_t \in \mathfrak{R}^p = (|x_{t,1}|, \dots, |x_{t,p}|)^T$ , де індекси  $t=1, \dots, T$  вказують на часові вікна, які мають постійний зсув та можуть мати певне перекриття. Для забезпечення певного рівня інваріантності до гучності звуку, розглядається нормалізований вектор  $x_t$ . Для зменшення похибки кластеризації можуть бути використані інші представлення сигналу, такі як кепстральні коефіцієнти або коефіцієнти поглинання.

Для порівняння точок необхідно використати міру подібності  $D(x, y)$ . В багатьох випадках в якості міри використовують евклідову відстань  $D(x, y) = \|x - y\|^2$ , однак вибір евклідової відстані передбачає евклідову геометрію. Емпіричні досвід показує, що для аудіо сигналу більш прийнятним є використання альтернативних мір, таких як відстань Кульбака-Лейблера або відстань Ітакури-Сайто, які представляють клас відстаней Брегмана. Відстань Брегмана визначається як  $D_\psi(x, y) = \psi(x) - \psi(y) - (x - y, \nabla \psi(y))$ , де  $\psi$  - строго випукла функція, і з певними припущеннями отримуємо

$$p_\mu(x) = h(x) \exp((x, \theta) - \psi(\theta)) = h_1(x) \exp(-D_{\psi^*}(x, \mu))$$

з  $h_1(x) = h(x)e^{\psi(x)}$ , де  $\psi^*$  - спряжена функція  $\psi$ ,  $\mu$  – параметр середнього,  $\theta = \nabla \psi(\mu)$ .

**Сегментація та кластеризація аудіо сигналу.** Приховані моделі Маркова (ПММ) є прихованими моделями, в яких приховані параметри стану відповідають марківській динаміці, тому є придатними для

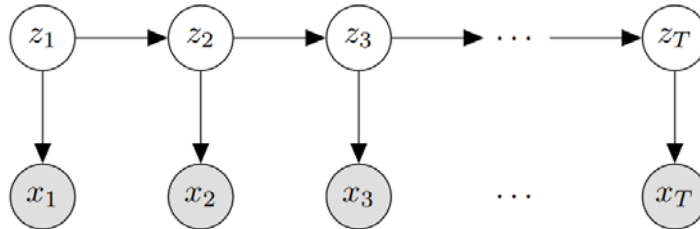


Рис. 1. Графічне представлення моделі ПММ

моделювання даних послідовної структури.  $(x_t)_{t=1..T}$  є послідовністю спостережень,  $x_t \in \mathfrak{R}^p$ , і  $(z_t)_{t=1..T}$  є послідовністю прихованих станів, до кожний стан є одним з  $K$  станів, так що  $z_t \in \{1, \dots, K\}$ . ПММ є генеративною прихованою моделлю, що описується генеративним процесом (рис. 1).

$$\begin{aligned} z_1 &\sim \pi, \\ z_t | z_{t-1} = i &\sim A_i, \quad t = 2, \dots, T, \\ x_t | z_t = i &\sim p_{\mu_i}, \quad t = 1, \dots, T. \end{aligned}$$

де  $\pi$  визначає розподіл  $z_1$ ,  $A \in \mathfrak{R}^{K \times K}$  – матриця переходів  $A_{ij} = p(z_t = j | z_{t-1} = i)$ ,  $A1=1$  і  $A_i = (A_{ij})_j$ , де  $1 = (1, \dots, 1)^T$ .  $\mu_k$  – параметр  $k$ -го розподілу, який асоціюється з дивергенцією Брегмана. Спільна ймовірність послідовності прихованих станів  $z_{1:T} = (z_1, \dots, z_T)$  та спостережень  $x_{1:T} = (x_1, \dots, x_T)$

$$p(x_{1:T}, z_{1:T}; \pi, A, \mu) = p(z_1; \pi) \prod_{t=2}^T p(z_t | z_{t-1}; A) \prod_{t=1}^T p(x_t | z_t; \mu).$$

Метою ймовірнісного синтезу є генерація прихованих станів з змінних спостереження у випадку



фіксованих параметрів  $\theta$  моделі. Цей процес передбачає обчислення апостеріорної ймовірності  $p(z_Q|x; \theta)$  на множині змінних прихованих станів  $z_Q$ . Іншою формою генерації є генерація з використанням оцінки апостеріорної ймовірності,  $\mathbf{z}^{MAP} = \arg \max_{\mathbf{z}} p(\mathbf{z}|\mathbf{x}; \theta) = \arg \max_{\mathbf{z}} p(\mathbf{x}, \mathbf{z}; \theta)$ .

В процесі генерації ПММ можна виділити наступні завдання:

- Згладжування: обчислення відособленої ймовірності окремого прихованого стану  $p(z_t|x_{1:T})$  для  $t < T$ .
- Фільтрація: обчислення  $p(z_t|x_{1:t})$  для процесу генерації онлайн.
- Прогнозування: обчислення  $p(z_t|x_{1:T})$  для  $t > T$  для прогнозування майбутніх станів.
- Генерація з використанням оцінки апостеріорної ймовірності: обчислення найбільш ймовірної послідовності  $\mathbf{z}_{1:T}^{MAP} = \arg \max_{\mathbf{z}_{1:T}} p(\mathbf{z}_{1:T}|x_{1:T})$ .

Для обчислення апостеріорних ймовірностей використовується алгоритм прямого-зворотного ходу. За цим алгоритмом рекурсивно обчислюються величини

$$\alpha_t(i) = p(z_t = i, x_1, \dots, x_t),$$

$$\beta_t(i) = p(x_{t+1}, \dots, x_T | z_t = i).$$

Якщо встановити  $\alpha_1(i) = \pi_i p(x_1 | z_1 = i; \mu_i)$ , інші  $\alpha_t$  обчислюються прямою рекурсією

$$\begin{aligned} \alpha_{t+1}(j) &= p(z_{t+1} = j, x_1, \dots, x_{t+1}) = \\ &= \sum_j p(z_t = i, z_{t+1} = j, x_1, \dots, x_{t+1}) = \\ &= \sum_j p(z_t = i, x_1, \dots, x_t) p(z_{t+1} = j | z_t = i) p(x_{t+1} | z_{t+1} = j) = \\ &= \sum_j \alpha_t(i) A_{ij} p(x_{t+1} | z_{t+1} = j; \mu_j) = . \end{aligned}$$

Аналогічно, якщо  $\beta_T(i) = 1$ ,  $\beta_t$  обчислюються зворотною рекурсією

$$\begin{aligned} \beta_t(i) &= \sum_j p(x_{t+1}, \dots, x_T | z_t = i, z_{t+1} = j) p(z_{t+1} = j | z_t = i) = \\ &= \sum_j A_{ij} p(x_{t+1} | z_{t+1} = j; \mu_j) \beta_{t+1}(j). \end{aligned}$$

Враховуючи обчислені  $\alpha$  та  $\beta$ , обчислюються ймовірності

$$\begin{aligned} p(z_t = i | x_{1:T}) &= \frac{p(z_t = i, x_{1:t}) p(x_{t+1:T} | z_t = i)}{p(x_{1:T})} = \frac{1}{Z} \alpha_t(i) \beta_t(i) = , \\ p(z_t = i, z_{t+1} = j | x_{1:T}) &= \frac{1}{Z} \alpha_t(i) A_{ij} p(x_{t+1} | z_{t+1} = j; \mu_j) \beta_{t+1}(j) , \\ p(z_t = i | x_{1:t}) &= \frac{1}{Z} \alpha_t(i) , \quad p(x_{1:T}) = \sum_i \alpha_T(i) . \end{aligned}$$

де  $Z$  – нормалізована константа рівняння.

Відповідно до оцінки апостеріорної ймовірності  $\mathbf{z}_{1:T}^{MAP} = \arg \max_{\mathbf{z}_{1:T}} p(\mathbf{z}_{1:T} | x_{1:T})$  використовують рекурсивну процедуру схожу до прямої рекурсії, в якій  $\Sigma_i$  заміщується  $\max_i$  (алгоритм Вітербі). Визначається

$$\gamma_t(i) = \max_{z_1, \dots, z_{t-1}} p(z_1, \dots, z_{t-1}, z_t = i, x_1, \dots, x_t).$$

Якщо встановити  $\gamma_1(i) = \pi_i p(x_1 | z_1 = i; \mu_i)$ , то рекурсія

$$\gamma_{t+1}(j) = \max_i \gamma_t(i) A_{ij} p(x_{t+1} | z_{t+1} = j; \mu_j).$$

Розподіл ймовірностей виходів відповідає наявним частотним компонентам перетворення. Функція ймовірності розглядається у формі  $p(x; \mu) = h(x) \exp(-D_{KL}(x||\mu))$ , де  $D_{KL}(x||\mu) = \sum_i x_i \log x_i / y_i$  - відстань Кульбака-Лейблера.

Одним із стандартних підходів, що використовуються в прихованих моделях, є метод максимальної правдоподібності. Для будь-якого розподілу ймовірностей  $q$  прихованих величин:

$$\log p(\mathbf{x}; \theta) = \log \sum_{\mathbf{z}} q(\mathbf{z}) \frac{p(\mathbf{x}, \mathbf{z}; \theta)}{q(\mathbf{z})} \geq \sum_{\mathbf{z}} \log q(\mathbf{z}) \frac{p(\mathbf{x}, \mathbf{z}; \theta)}{q(\mathbf{z})}.$$

На Е-кроці беруть  $q(\mathbf{z}) = p(\mathbf{z}|\mathbf{x}; \theta)$ , потім на М-кроці визначають максимум нижньої границі відносно  $\theta$ , що еквівалентно визначенню максимуму  $E_{z \sim q}[\log p(\mathbf{x}, \mathbf{z}; \theta)]$ . В ПММ на Е-кроці визначається

апостеріорна ймовірність для кожного стану та кожної пари станів в прихованій послідовності, використовуючи метод прямого-зворотного ходу, і ці величини потім використовуються на М-кроці оновлення параметрів. У випадку незалежних спостережень, можна використати факторний розподіл  $q(z) = \prod_t q_t(z_t)$ .

Відповідно до інкрементного EM-алгоритму для ПММ, необхідно інкрементно оновлювати розподіл  $q$  з кожним нових спостереженням. Використовуючи умовні залежності ПММ, розподіл визначається як  $q(z_{1:T}) = q_1(z_1|x_{1:T}) \prod_{t \geq 2} p(z_t|z_{t-1}, x_{1:T})$ . Можна обмежити розподіл  $q$  до форми  $q(z_{1:T}) = q_1(z_1) \prod_{t \geq 2} q(z_t|z_{t-1})$ , з  $\sum_j q_t(j|i)$  для всіх  $t$  та  $i$ . В даному випадку  $q$  границі по  $z_t$  визначаються за виразом  $\phi_t(z_t) = \sum_{z_{1:t-1}} q_1(z_1) \dots q_t(z_t)$ , який може бути обчислений інкрементно з  $\phi_1(i) = q_1(i)$  та  $\phi_t(j) = \sum_i \phi_{t-1}(i) q_t(j|i)$  для  $t \geq 2$ . Далі границя береться у формі  $q(z_{t-1}, z_t) = \phi_{t-1}(z_{t-1}) q(z_t|z_{t-1})$ . Тоді отримуємо нижню границю правдоподібності

$$\tilde{f}_T(\theta) = \mathbb{E} \left[ \log \frac{p_\theta(x_{1:T}, z_{1:T})}{q(z_{1:T})} \right] = \sum_{t=1}^T \left[ \log \frac{p_\theta(x_t, z_t|z_{t-1})}{q_t(z_t|z_{t-1})} \right] = \sum_{t=1}^T \sum_{z_{t-1}, z_t} \phi_{t-1}(z_{t-1}) q_t(z_t|z_{t-1}) \log \frac{p_\theta(x_t, z_t|z_{t-1})}{q_t(z_t|z_{t-1})}$$

Відповідно до розширення до напівприхованої марківської моделі необхідно параметризувати моделі з двома прихованими величинами, станом поточного сегменту,  $z_t$ , та лічильником часових кроків з початку сегменту  $z_t^D$ . В цьому випадку ймовірності переходів визначають за виразами

$$p(z_t = j | z_{t-1} = i, z_t^D = d) = \begin{cases} A_{ij}, & d = 1, \\ \delta(i, j), & \text{інакше,} \end{cases}$$

$$p(z_t^D = d' | z_{t-1} = i, z_{t-1}^D = d) = \begin{cases} \lambda_i(d), & d' = d + 1, \\ 1 - \lambda_i(d), & d' = 1, \\ 0 & \text{інакше.} \end{cases}$$

Якщо  $\lambda_i(d) = D_i(d+1)/D_i(d)$ , де  $D_i(d) := \sum_{d' \geq d} p_i(d')$ , тоді апіорна ймовірність отримання сегмента довжини як мінімум  $d$  буде рівна  $\lambda_i(1) \dots \lambda_i(d-1) = D_i(d)$ , і отримання сегмента з довжиною  $d$  буде  $\lambda_i(1) \dots \lambda_i(d-1) (1 - \lambda_i(d)) = p_i(d)$ .

**Результати сегментації аудіо сигналу.** Розглянутий алгоритм було застосовано для акустичної сегментації аудіо сигналу, який містить музику (рис. 2,а). Було використано віконне перетворення Фур'є, частота дискретизації 22,05 кГц, використано вікно Хаммінга розміру 2048 з зсувом на 256, число частотних компонент 1024. Також сегментацію було застосовано до датасету Office Live Dataset (рис. 2,б), метою було сегментувати різні за характером звуки, такі як звуки падінь, скрипи і тому подібне. Ці звукові сигнали не завжди є однорідні, тому ставилося за мету виділити однорідні сегменти для подальшого пошуку звукових паттернів. Дані по якості сегментації та кластеризації наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Дані кластерної належності

Тип аудіо сигналу	Відносна кластерна належність, %	Розрахована кластерна належність, %
Музика	74,43	87,93
Нерівномірний звуковий сигнал	76,02	89,37

**Висновки.** Кластерний аналіз невідомих аудіо даних є складним завданням, одним з таких, що не має загального рішення. В статті запропоноване рішення на основі прихованих марківської та напів-марківської моделей, використання яких дозволяє об'єднати процеси сегментації та кластеризації. Сходимість навчання моделей потребує подальшого дослідження. Даний метод є цілковито підходом навчання без вчителя, тому дозволяє сегментувати та кластеризувати аудіодані, про які немає попередньої інформації, ґрунтуючись на статистичних характеристиках.

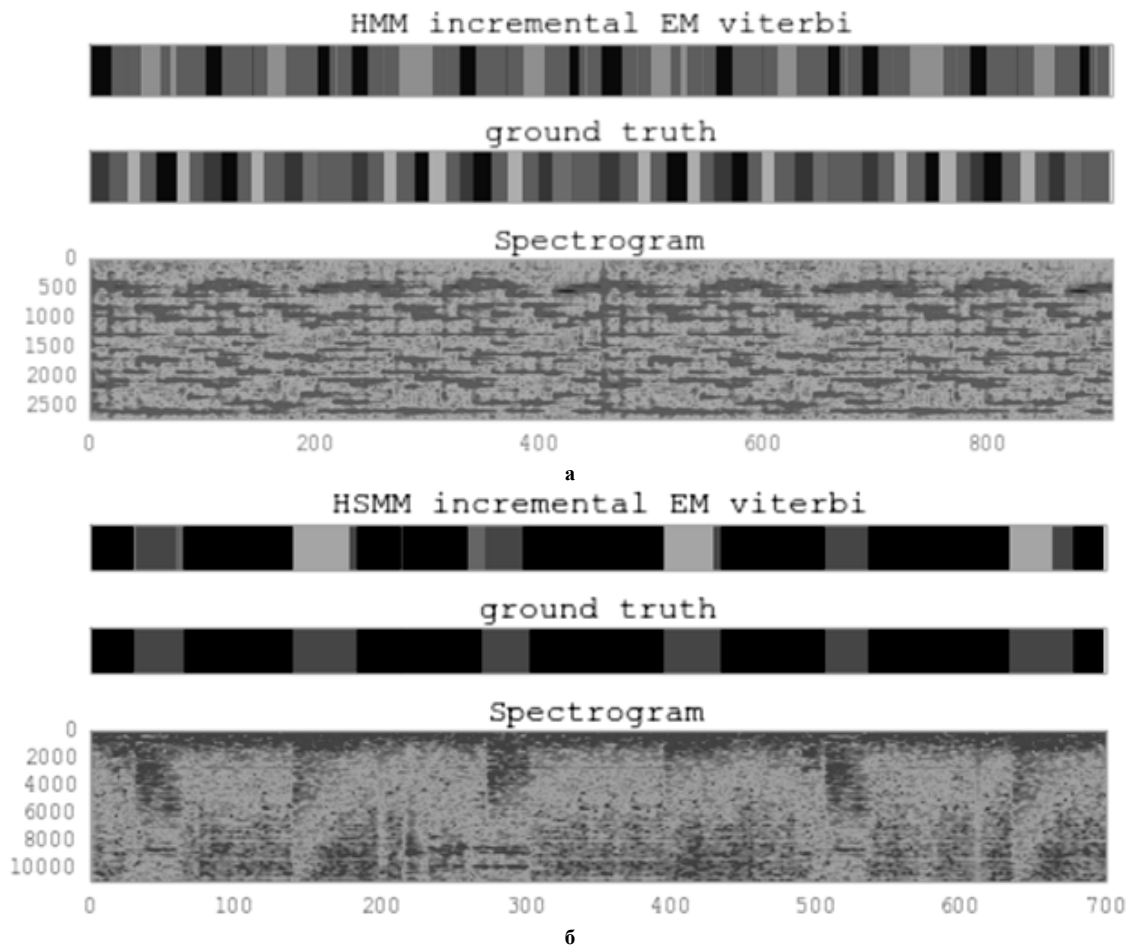


Рис. 2. Результати сегментації аудіо сигналу, (а) – музика, (б) – звукові сигнали

### Література

1. R. Sinha, S.E. Tranter, M.J.F. Gales, P.C. Woodland, The Cambridge University March 2005 speaker diarisation system, in: Proceedings of the European Conference on Speech Communication and Technology, Lisbon, Portugal, September 2005, pp. 2437–2440.
2. W.H. Tsai, S.S. Cheng, H.M. Wang, Speaker clustering of speech utterances using a voice characteristic reference space, in: Proceedings of the International Conference on Spoken Language Processing, Jeju Island, Korea, October 2004.
3. D. Liu, F. Kubala, Online speaker clustering, in: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 1, Montreal, Canada, May 2004, pp. 333–336.
4. S.S. Chen, P.S. Gopalakrishnan, Clustering via the Bayesian information criterion with applications in speech recognition, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, Seattle, USA, May 1998, pp. 645–648.
5. S. Meignier, D. Moraru, C. Fredouille, J.F. Bonastre, L. Besacier, Step-by-step and integrated approaches in broadcast news speaker diarization, *Comput. Speech Language* 20 (2–3) (April–July 2006) 303–330.
6. V. Wan, W.M. Campbell, Support vector machines for speaker verification and identification, in: Proceedings of the Neural Networks for Signal Processing, vol. 10, Sydney, Australia, December 2000, pp. 775–784.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.      Надрукована/Printed : 20.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Полікарівських О.І.

**ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ НАЙКВІСТОВОГО ЕЛЕМЕНТА НА  
ОСНОВІ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

На сьогоднішній день всі цифрові системи зв'язку використовують принципи позиційного кодування інформації. В роботі проведений аналіз щодо інформаційної ємності найквісового елемента в позиційних системах, що у випадку збільшення є величиною постійною і залежить від основи алфавіту, а в таймерних сигнальних конструкціях – змінною і залежить від ряду інформаційних параметрів. Сформульовані недоліки позиційних систем кодування та переваги таймерних сигнальних конструкцій над позиційним методом кодування. Описані методи підвищення інформаційної ємності найквісового елемента за допомогою таймерних сигнальних конструкцій. На відміну від позиційного кодування, за якого мінімальна енергетична відстань визначається енергією найквісового елемента, у запропонованих таймерних сигнальних конструкціях мінімальна енергетична відстань між дозволеними таймерними сигнальними конструкціями в декілька разів менша елемента найквіста.

**Ключові слова:** інформація, позиційне кодування, модель Гільберта, таймерна сигнальна конструкція, значущий момент модуляції, інформаційна ємність найквісового елемента, інтервал реалізації.

V.I. LUZHANSKY, L.V. KARPOVA, D.G. SHASHKOV  
Khmelnitskyi National University

**INCREASING THE INFORMATION QUALITY OF THE LABOR  
ELEMENT BASED ON TIMER SIGNAL CONSTRUCTIONS**

To date, all digital communication systems use the principles of positioning information coding. In this work an analysis was carried out on the information capacity of the quiver element in positional systems, which in the case of magnification is a constant value and depends on the basis of the alphabet, and in timer signal structures, it is a variable and depends on a number of information parameters. The flaws of positional coding systems and advantages of timer signal constructions over the positional coding method are formulated. Methods of increasing the information capacity of the quiver element using timer signal constructions are described. In contrast to positional coding, in which the minimum energy distance is determined by the energy of the Nyquist element, in the proposed timer signal constructions, the minimum energy distance between the allowed timer signal constructions is several times smaller than the nickname element. The analysis of positions correction codes and quality of signal transmission on the channels of the Hilbert model is carried out. Defined transmission quality parameters in the "good" and "bad" states of the channel. The Hilbert model assumes two states of a discrete channel. In the "good" state there are no errors, and in the "bad" probability of error takes some value more than 0. Change of states is described by the Markov chain. It is shown that the number of realizations during the synthesis of timer signal constructions is much more than the number of implementations of position codes. Information capacity with timer encoding is greater information capacity when position coded. With the use of timer signal constructions, with the increase of the implementation interval «m», the total capacity of the implemented ensembles increases.

**Keywords:** information, position coding, Hilbert model, timer signal design, significant modulation moment, information capacity of the quiver element, interval of realizations.

**Вступ**

Двійкові коригувальні блокові коди – це такі коди, в яких кодування і декодування здійснюється в межах блока, який складається з певного числа кодових символів. У літературі з завадостійкого кодування блоки кодових символів називають по-різному: кодовими комбінаціями, кодовими словами й кодовими векторами. При аналізі блокових кодів передбачається синхронний метод передачі, який характеризується постійними величинами довжини кодового слова та довжини елементарної посилки, яка дорівнює  $t_0 = 1/2\Delta F$  ( $t_0 = 1/\Delta F$ ). При синхронному методі передачі реалізується послідовна передача коефіцієнтів  $\alpha_i$  полінома:

$$G(a) = \alpha_{n-1}a^{n-1} + \alpha_{n-2}a^{n-2} + \dots + \alpha_1a + \alpha_0, \quad (1)$$

де  $a$  – позиційність системи (число станів інформаційного параметру);  $\alpha_i$  – коефіцієнти, число яких дорівнює  $a$ :

$$\alpha = a-1; a-2; \dots 0 \quad (\alpha_i \leq a-1).$$

При передачі по каналу з базою  $B = t_0 \cdot \Delta F = 1$  ( $t_0 = 1/\Delta F$ ) кожний із коефіцієнтів  $\alpha_i$  передається відповідним сигналом тривалістю  $t_0$ . Такий метод кодування називається позиційним (або розрядно-цифровим кодуванням РЦК).

Таймерні сигнальні конструкції (ТСК) були запропоновані у 80-і роки ХХ ст. для задачі підвищення швидкості передачі інформації в бінарному каналі. Завдяки таймерним сигналам вдалося збільшити швидкість передачі практично вдвічі на інтервалі «хорошого» стану нестационарних каналів за рахунок укрупнення сигналів словника. Також ТСК мають властивості завадостійкого коду, але надлишковість у вигляді додаткових перевірючих символів в них не використовується. Таким чином дослідження завадостійких методів передачі на основі ТСК є актуальною задачею.

**Метою статті** є збільшення інформаційної ємності найквісового елемента при незмінному числі різних значень інформаційного параметра сигналу і довжині кодового слова.

**Результати дослідження.** Принцип кодування позиційних систем полягає у наступному:

Число  $N$ , що складається з  $n$  розрядів та має основу  $a$ , може бути представлено у виді суми:

$$N = \sum_{i=1}^n \alpha_i a^i, \quad (2)$$

де  $\alpha_i$  – значення розрядного коефіцієнта ( $\alpha_i \leq a-1$ ),  $i$  – розряд. Для двійкової системи  $a=2$ , а коефіцієнти  $\alpha_i \in 0;1$ .

Якщо кількість сигналів інформаційного параметру сигналів в каналі «а» відповідає числу різних значень  $\alpha_i$ , а мінімальна відстань між суміжними моментами модуляції в каналі, який обмежений по частоті смугою  $\Delta F$ , не менше  $t_0 = 1/2\Delta F$ , то по каналу зв'язку в заданій послідовності можна передавати коефіцієнти  $\alpha_i$ , які будуть містити інформацію щодо числа  $N$ . При цьому слід враховувати, що реальні канали зв'язку моделі Гільберта, наприклад канали міської телефонної мережі (МТМ), забезпечують достатньо велику середню імовірність помилкового прийому кодового слова  $P_{\text{Кс}} \geq 10^{-3} \div 10^{-4}$  при якості приймання в «хорошому» стані каналу  $10^{-7} \div 10^{-8}$  [1].

Розглянемо модель Гільберта і визначимо її основні параметри [2]. Дана модель передбачає наявність двох станів дискретного каналу. У «хорошому» стані, або Х-стані, помилок не виникає. У «поганому», або П-стані, можливе виникнення помилок із імовірністю  $p_{\text{П}}$ . Зміна станів описується ланцюгом Маркова. Поведінка системи може бути представлена графом (рис. 1).

Зміна станів моделі визначається матрицею перехідних імовірностей:

$$P = \begin{bmatrix} P_{\text{ХХ}} & P_{\text{ХП}} \\ P_{\text{ПХ}} & P_{\text{ПП}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Дискретним кроком системи є одиничний елемент. Сенс перехідної

$$\text{ймовірності} - P_{\text{ХХ}} + P_{\text{ХП}} = 1, P_{\text{ПХ}} + P_{\text{ПП}} = 1. \quad (4)$$

Середня ймовірність помилкового прийому елемента:

$$\bar{p}_n = p_{\text{П}} \cdot P_{\text{П}} = p_{\text{П}} \cdot \frac{P_{\text{ХП}}}{P_{\text{ПХ}} + P_{\text{ХП}}}. \quad (5)$$

Середні довжини «поганого» і «хорошого» станів каналу визначаються як:

$$\bar{l}_{\text{Х}} = \frac{1}{P_{\text{ХП}}}; \bar{l}_{\text{П}} = \frac{1}{P_{\text{ПХ}}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт групування помилок:

$$\alpha = 1 - P_{\text{ХП}} - P_{\text{ПХ}}. \quad (7)$$

Параметри моделі Гільберта визначають середні довжини пакетів помилок і відстані між ними, тобто середні довжини «хорошого» і «поганого» станів. Шукані параметри можна оцінювати використовуючи статистику довжин станів  $\bar{l}_{\text{Х}}$ ,  $\bar{l}_{\text{П}}$ .

Оцінити параметри каналу можна по визначеним середнім довжинам станів:

$$P_{\text{ХП}} = \frac{1}{\bar{l}_{\text{Х}}}; P_{\text{ПХ}} = 1 - P_{\text{ХП}}; P_{\text{ПХ}} = \frac{1}{\bar{l}_{\text{П}}}; P_{\text{ХХ}} = 1 - P_{\text{ПХ}}. \quad (8)$$

Елементарне послання, яке дорівнює «елементу Найквіста», обмежує ефективність коду і мінімальну кодову відстань між кодограмами простого коду, що унеможливує при заданій елементарності коду ( $n$ ) реалізувати більше сигнальних конструкцій ніж  $a^n$  ( $a$  – число станів інформаційного параметра).

Відомо, що для забезпечення високої якості передачі  $P_{\text{зад}} < 10^{-6} \div 10^{-7}$  при позиційному блоковому кодуванні формуються коригуючі сигнальні конструкції, в яких інформаційні елементи як частина кодової конструкції ( $m$ ) збільшується на « $k$ » додаткових елементів, що дозволяє проводити синдромне виявлення та виправлення помилок.

Вимоги, які висуваються при передачі даних у мережах передавання встановлюють імовірність виникнення помилки не гірше  $10^{-6} \dots 10^{-9}$ . Але такі вимоги не відповідають реальним каналам зв'язку, у яких зазначена імовірність є не нижчою за  $10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Тому виникає задача по збільшенню вірності передачі (зниженню ймовірності помилки). Цю задачу можна вирішити за допомогою коригуючих кодів, які виявляють та виправляють помилки.

Будь-який корегувальний код є надлишковим кодом, оскільки має зайві кодові комбінації (КК). В таких кодах загальне число елементів у кодовій комбінації « $n$ » включає « $m$ » інформаційних та « $k$ »

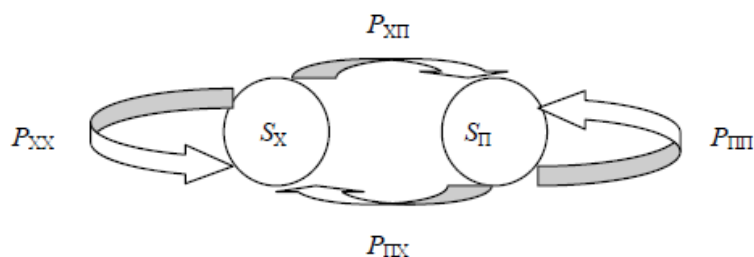


Рис. 1. Граф станів моделі Гільберта

перевірочних елементів.

$$n = m + k . \quad (9)$$

Число  $m$  визначається від числа різних об'єктів  $N$ , про які передається інформація:

$$m = E^+ \log_2 N , \quad (10)$$

де  $E^+$  – символ найближчого великого цілого числа (значення логарифму).

Принцип виявлення помилок надлишковими кодами полягає у наступному.

Із загальної кількості  $N_{\Sigma} - N^+$  кодових комбінацій  $n$  символів ( $a$  – основа коду) для передавання дискретних повідомлень використовуються не всі, а тільки та необхідна кількість кодових комбінацій  $N^+$ , що дорівнює об'єму первинного алфавіту джерела  $N_{дж}$ . Решта  $N = N_{\Sigma} - N^+$  кодових комбінацій (не використовуваних) є забороненими, тобто вони не можуть передаватися каналами зв'язку. Якщо в результаті помилок передана (дозволена) комбінація перетвориться на одну із заборонених, то це й сигналізуватиме про наявність помилок [1].

Сформулюємо основні ознаки та недоліки позиційного кодування:

- на інтервалі реалізації  $T_p = mt_0$  може бути сформовано  $N_p = 2^m$  кодових слів;
- мінімальна енергетична кодова відстань між КК визначається енергією найквістового елементу  $t_0 = 1/2\Delta F$ , що унеможливило забезпечити обмін якості передачі в «хорошому» стані каналу на швидкість передачі;
- мінімальна відстань між моментами модуляції зміни сигналу кратна інтервалу найквіста;
- кількість інформації, яка може бути передана одним інформаційним елементом може бути більше величини  $l_0 \leq \log_2 a$  [1];
- синтезовані на базі позиційного кодування коригувальні коди мають найбільшу швидкість передачі в реальних каналах при рівності питомої ваги інформаційних ( $m$ ) та додаткових ( $k$ ) елементів (при цьому  $m = 45 \div 50$ , ефективна швидкість передачі  $R_e \leq m/n \approx 0.5$ );
- блокові конструкції коригуючих позиційних кодів, які використовують на практиці являють собою багатовекторні конструкції з числом координат  $n \in 100 \div 1000$ , що суттєво впливає на якість передачі.

Ентропія кодового слова (кодової конструкції) при позиційному кодуванні визначається кількістю реалізацій ( $N_{рп}$ ) кодових конструкцій:

$$H = \log_2 N_{рп} , N_{рп} = a^n , \quad (11)$$

де  $a$  – основа коду (кількість різних значень інформаційного параметра);  $n$  – кількість елементів (посилок) у кодовому слові. Мінімальна тривалість кодового елемента ( $t_0$ ) не може бути меншою від тривалості перехідного процесу:

$$t_0 = 1/\Delta F , \quad (12)$$

де  $\Delta F$  – смуга пропускання каналу. Отже, при позиційному кодуванні відстань між моментами модуляції кратна найквістовому елементу тривалістю  $t_0$ .

Враховуючи, що мінімальна енергетична відстань між кодовими конструкціями при позиційному кодуванні дорівнює енергії одного найквістового елемента тривалістю  $t_0$ , збільшити кількість реалізацій на заданому інтервалі часу  $T_{ск} = nt_0$  можна тільки зменшивши енергетичну відстань між кодовими конструкціями. Це завдання можна вирішити використовуючи таймерні сигнальні конструкції.

У таймерних сигнальних конструкціях на відміну від позиційного кодування інформація про кодове слово міститься не в “ $n$ ” найквістових елементах (“+” або “-”), а в тривалостях окремих відрізків “ $i$ ” сигналів ( $\tau_{ci}$ ), синтезованих на інтервалі  $T_c = mt_0$ , кожний з яких не менший від найквістового ( $t_0$ ):

$$\tau_{ci} = t_0 + z\Delta , z \in (2; 3 \dots z_0) \text{ цілі числа}, \quad (13)$$

де  $\Delta$  – частина елемента  $t_0$  ( $\Delta = t_0/s$ ),  $s \in (2; 3 \dots s_0)$  – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків ( $\tau_{ci}$ ) із заданою ймовірністю помилки на виході каналу за відомої завадової обстановки;  $m$  – кількість найквістових елементів, які беруть участь у формуванні цього ансамблю ТСК.

На рис. 1 представлено декілька таймерних кодових конструкцій з трьома значущими моментами модуляції (ЗММ) [1]:

- 1) кодове слово при позиційному кодуванні ( $T_{ск} = 5t_0$ );
- 2) таймерне кодове слово з трьома ЗММ з інтервалами кратними  $t_0$ ;
- 3) таймерне кодове слово при  $i = 3$  з інтервалами міжсуміжними ЗММ  $\tau_{ci} = t_0 + k\Delta$ ;  $k \in 1 \dots c$ ;
- 4) четверте кодове слово ТСК із зміщенням двох ЗММ на величину  $\Delta$ .

Таким чином, в таймерних конструкціях мінімальна відстань  $\tau_{cm}$  між суміжними значущими моментами модуляції реалізованої кодової конструкції ( $\tau_{cm}$  – має нижню межу, що дорівнює найквістовому елементу):

$$\tau_{ci} \geq s\Delta + i\Delta; \quad i \in 0, 1, 2, \dots, z - \text{ціле число.} \quad (14)$$

Перший доданок виразу (14) відповідає мінімальному інтервалу, тобто найквістовому елементу ( $t_0 = s\Delta$ ), а доданок  $i\Delta$  показує наскільки  $\tau_{ci}$  більше найквістового елемента в елементах  $\Delta$ . При таких умовах потужність реалізованого ансамблю  $N_{PT}$  на інтервалі  $T_{СК} = mt_0$  визначається наступним виразом:

$$N_{PT} = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!}, \quad (15)$$

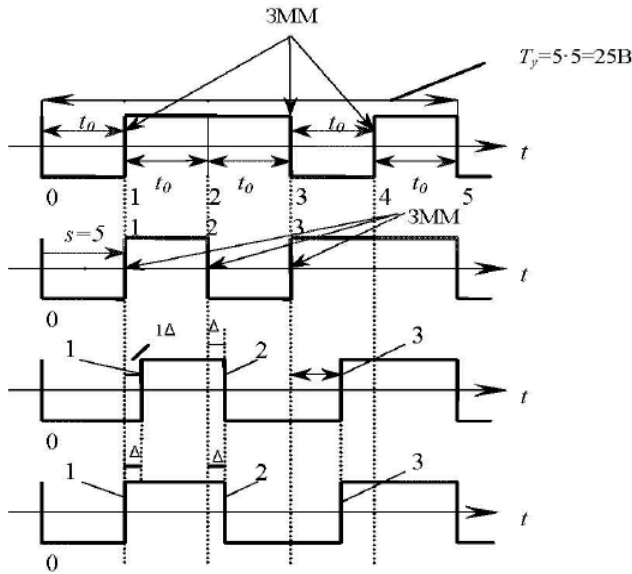
де  $i$  – число заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова довжиною  $m$  найквістових елементів. Наприклад, для  $m=10$  і  $s=8$  при синтезі сигнальної конструкції з трьох інформаційних відрізків ( $i=3$ ):

$$N_{PT} = \frac{59!}{3! \cdot 56!} = 32509,$$

що майже у 32 рази більше числа кодових слів позиційного коду при  $m=10$  ( $2^{10} = 1024$ ).

Із таблиці 1 і 2 випливає:

Рис. 2. Структура таймерних сигнальних конструкцій при  $i=3, s=5$



- 1) число реалізацій ТСК  $N_{PT}$  зростає зі збільшенням параметрів  $m$  і  $s$ ;
- 2) при  $i = m$  (в найквістових елементах) можлива тільки одна реалізація ( $N_{PT} = 1$ );
- 3) при  $i < m$  число реалізацій  $N_{PT} = 0$ ;
- 4) в тому самому інтервалі синтезу ТСК ( $m = const$ ) кількість реалізацій можна істотно збільшити, використовуючи ансамблі, які містять конструкції з різною кількістю відрізків « $i$ ».

Таблиця 1

**Число реалізацій ТСК при  $m \in 3 \div 12$  для  $i = 1; 2; 3; s = 2; 4; 6; 8; 10$**

$i$	$S$	$m$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		$2^m$	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
1	2	$N_{PT}$	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	4	$N_{PT}$	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45
	6	$N_{PT}$	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67
	8	$N_{PT}$	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89
	10	$N_{PT}$	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111
2	2	$N_{PT}$	6	15	28	95	66	91	120	153	190	231
	4	$N_{PT}$	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861
	6	$N_{PT}$	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891
	8	$N_{PT}$	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321
	10	$N_{PT}$	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151
3	2	$N_{PT}$	1	10	35	84	165	286	455	680	969	1330
	4	$N_{PT}$	1	35	165	455	969	1771	2925	4495	6545	9139
	6	$N_{PT}$	1	84	455	1330	2925	5456	9139	1490	20825	29260
	8	$N_{PT}$	1	165	969	2925	6545	12341	20825	32509	47905	67525
	10	$N_{PT}$	1	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196	91881	129766

У двійковому каналі ентропія ( $H$ ) кодових слів може перевищувати тривалість кодового слова  $n$ . Такі умови можна створити за допомогою ансамблів сигнальних конструкцій з різною кількістю інформаційних відрізків ( $\tau_{ci}$ ) на інтервалі  $T_{СК} = mt_0$ , якщо  $m = const$ . Отже, у двійковому каналі на одному інтервалі Найквіста можна передавати більше від одного біта інформації.

Інформаційна ємність найквістового елемента визначається:

$$I_H = \frac{\log_2 N_{PT}}{m}. \quad (16)$$

У таблиці 3 наведені значення інформаційної ємності найквістового елемента  $I_H$  при значеннях  $m \in (3 \div 11)$ ;  $i \in (1 \div 3)$ ;  $i \in (4 \div 5)$ ;  $S \in 2; 4; 6; 8; 10$ .

Таблиця 2

Число реалізацій для ТСК при  $m \in 4 \div 12$  для  $i = 4; 5; 6$ ;  $s = 2; 4; 6; 8; 10$

$i$	$s$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	2	$N_{PT}$	1	15	70	210	495	1001	1820	3060	4845
	4	$N_{PT}$	1	70	495	1820	4845	10626	20475	35960	58905
	6	$N_{PT}$	1	210	1820	7315	20475	46376	91390	163185	270725
	8	$N_{PT}$	1	495	4845	20475	58905	135751	270725	487635	814385
	10	$N_{PT}$	1	1001	10626	46376	135751	316251	635376	1150626	1929501
5	2	$N_{PT}$	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628
	4	$N_{PT}$	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336
	6	$N_{PT}$	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939
	8	$N_{PT}$	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147
	10	$N_{PT}$	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259390
6	2	$N_{PT}$	0	0	1	28	210	924	3003	8008	18564
	4	$N_{PT}$	0	0	1	210	3003	18564	74613	230230	593775
	6	$N_{PT}$	0	0	1	924	18564	134596	593775	1947792	5245786
	8	$N_{PT}$	0	0	1	3003	74613	593775	2760681	9366819	25827165
	10	$N_{PT}$	0	0	1	8008	230230	1947792	9366819	32468436	90858768

Таблиця 3

Значення інформаційної ємності найквістового елемента

$i$	$S$	$m$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	$I_N$	0,774	0,702	0,634	0,577	0,529	0,488	0,454	0,425	0,399
	4	$I_N$	1,057	0,925	0,817	0,732	0,663	0,607	0,56	0,521	0,487
	6	$I_N$	1,233	1,062	0,929	0,826	0,744	0,678	0,624	0,578	0,506
	8	$I_N$	1,362	1,161	1,009	0,893	0,802	0,729	0,669	0,619	0,576
	10	$I_N$	1,464	1,239	1,072	0,945	0,847	0,769	0,704	0,651	0,605
2	2	$I_N$	0,862	0,977	0,961	0,915	0,863	0,813	0,767	0,726	0,688
	4	$I_N$	1,302	1,373	1,301	1,209	1,121	1,043	0,973	0,913	0,859
	6	$I_N$	1,602	1,626	1,514	1,39	1,279	1,182	1,098	1,025	0,962
	8	$I_N$	1,83	1,814	1,668	1,522	1,392	1,282	1,187	1,106	1,036
	10	$I_N$	2,015	1,963	1,791	1,625	1,482	1,361	1,258	1,17	1,094
3	2	$I_N$	0	0,83	1,026	1,065	1,052	1,02	0,981	0,941	0,902
	4	$I_N$	0	1,282	1,473	1,472	1,417	1,349	1,279	1,213	1,103
	6	$I_N$	0	1,598	1,766	1,73	1,645	1,552	1,462	1,379	1,304
	8	$I_N$	0	1,842	1,984	1,919	1,811	1,585	1,594	1,499	1,413
	10	$I_N$	0	2,04	2,158	2,069	1,942	1,814	1,697	1,592	1,499
4	2	$I_N$	0	0	0,781	1,022	1,102	1,119	1,107	1,083	1,053
	4	$I_N$	0	0	1,226	1,492	1,547	1,53	1,486	1,432	1,376
	6	$I_N$	0	0	1,543	1,805	1,834	1,79	1,722	1,648	1,574
	8	$I_N$	0	0	1,79	2,04	2,046	1,98	1,895	1,805	1,718
	10	$I_N$	0	0	1,993	2,229	2,214	2,131	2,03	1,928	1,83
5	2	$I_N$	0	0	0	0,732	0,997	1,106	1,148	1,155	1,145
	4	$I_N$	0	0	0	1,163	1,476	1,574	1,59	1,57	1,53
	6	$I_N$	0	0	0	1,475	1,799	1,88	1,873	1,831	1,774
	8	$I_N$	0	0	0	1,722	2,045	2,107	2,082	2,022	1,95
	10	$I_N$	0	0	0	1,925	2,242	2,289	2,247	2,173	2,089

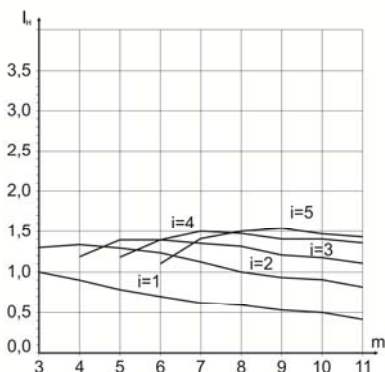


Рис. 3. Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини  $m$  ТСК при  $s = 4$

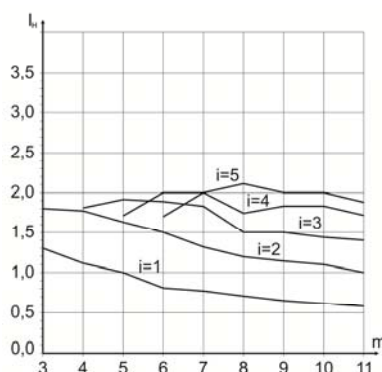


Рис. 4. Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини  $m$  ТСК при  $s = 8$

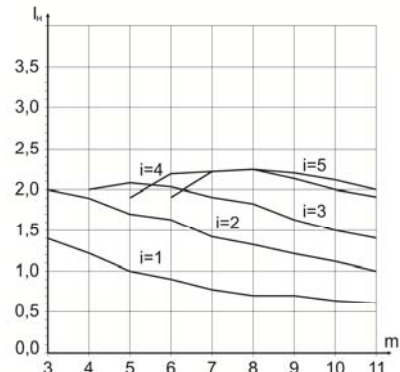


Рис. 5. Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини  $m$  ТСК при  $s = 10$



На рисунках 3, 4, 5 представлені залежності ємності найквістового елемента від  $m$  та  $i$  з урахуванням виразу (16) та розраховані для  $s = 4$ ,  $s = 8$ ,  $s = 10$ .

### Висновки

1. При зменшенні параметра  $S$  падає інформаційна ємність найквістового елемента. Наприклад, при  $i = 4$ ,  $m = 8$ ,  $s = 8$  інформаційна ємність  $I_H = 1,98$  біт на елемент, а при  $s = 6$ ,  $I_H = 1,79$  біт на елемент. В даному випадку інформаційна ємність зменшується на 40,4% при ймовірності бітової помилки не гірше  $5 \cdot 10^{-5}$ .

2. При збільшенні  $S$  з 8 до 10 збільшується інформаційна ємність і зростає число реалізацій  $N_{PT}$  з 58905 до 135751, що підвищує ймовірність бітової помилки ( $P > 10^{-5}$ ) та призводить до зниження якості передачі цифрової інформації.

3. На інформаційну ємність найквістового елемента  $I_H$  впливає кількість переходів "і" в таймерних сигнальних конструкціях. Збільшення числа заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова  $i \in (1 \div 5)$  дає змогу підвищити показник інформаційної ємності  $I_H$ , але при  $i \rightarrow m-1$  значення  $I_H$  падає. Максимальне значення інформаційної ємності досягається при  $i = 5$ . Якщо  $i = 5$ ,  $m = 8$  при  $s = 10$ , то  $I_H = 2,289$  біт на елемент, але при цьому ймовірність помилкового прийому  $P_{\text{пом}} > 10^{-5}$ , що призводить до зниження якості передачі цифрової інформації. Рациональне значення інформаційної ємності можна отримати при  $s = 8$ ,  $m = 8$ ,  $i = 5$  тоді,  $I_H = 2,107$  біт на елемент, що дозволяє забезпечити високу якість передачі інформації ( $P_{\text{пом}} < 10^{-5}$ ).

### Література

1. Захарченко М. В. Порівняння синдромних методів для коригуючих блокових позиційних і таймерних кодів / М. В. Захарченко, М. М. Гаджиев, Б. К. Радзімовський, Ю. С. Горохов, Д. О. Шпак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2(9). – С. 4–8.
2. Захарченко М. В. Системи передавання даних. «Радіотехніка». Т. 1: Ефективність блокового кодування / [Захарченко М. В., Кільдішев В. Й., Мартинова О. М., Ільїн Д. Ю., Трінтіна Н. А.]. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2014. – 488 с.
3. Захарченко Н. В. Увеличение информационно емкости найквістового елемента при передаче 2-х символьних ансамблей таймерними сигналами / Н. В. Захарченко, В. В. Гордейчук, Е. А. Севастев // Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. – 2016. – № 2(26). – С. 21–25.
4. Захарченко Н. В. Эффективность двухсимвольных ансамблей в симпліксних системах на базе коректуючих таймерних сигнальних конструкцій / Н. В. Захарченко, В. Й. Кільдішев, Д. В. Голєв, А. В. Толкачев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнародний науково-технічний журнал / Хмельницький національний університет. – 2017. – № 1. – С. 215–218.
5. Horiashchenko Kostyantyn. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components / К. Horiashchenko, О. І. Майданєтс // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах": сб. наук. пр. – Одеса, 6-12 червня 2014 р. – С. 71-72

### References

1. Porivnjannja syndromnyh metodiv dlja korygujuchyh blokovyh pozycijnyh i tajmernih kodiv / M. V. Zaharchenko, M. M. Gadzhiev, B. K. Radzimov's'kyj, Ju. S. Gorohov, D. O. Shpak // Vostochno-Evropejs'kyj zhurnalпередovyh tehnologyj. - 2014. - № 2(9). - S. 4-8.
2. Zaharchenko M.V. Systemy peredavannja danyh. «Radiotekhnika». - T. 1: Efektyvnist' blokovogo koduvannja / [Zaharchenko M.V., Kil'dishev V.J., Martynova O.M., Il'in D.Ju., Trintina N.A.]. - Odessa: ONAZ im. O.S. Popova, 2014.-488 s.
3. Zaharchenko N. V. Uvelychenye ynformacyonno emkosti najkvystovogo elementa pry peredache 2-h symvol'nyh ansamblej tajmernymy sygnalamy / Zaharchenko N. V., Gordejchuk V.V., Sevastev E. A. // Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. - 2016. - № 2(26). - S. 21-25.
4. Zaharchenko N.V. Efektyvnost' duhsymvol'nyh ansamblej v symplnksnyh systemah na baze korrektyrujushhyh tajmernih sygnal'nyh konstrukcyj / N.V. Zaharchenko, V.J. Kyl'dyshev, D.V Golev, A.V. Tolkachev // Vymirjuval'na ta obchysljuval'na tehnika v tehnologichnyh procesah: mizhnarodnyj naukovo-tehnichnyj zhurnal. Khmelnytskyi National University. – 2017. - № 1. – S. 215-218.
5. Horiashchenko K.L., Maydanets O.I.. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. Odess, 6-12 jun 2014. p.71-72

Рецензія/Peer review : 9.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ

Національна академія Державної прикордонної служби

А.В. ТКАЧУК

Хмельницький національний університет

## СИНТЕЗ КОГЕРЕНТНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ІМПУЛЬСІВ З ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ І НЕЛІНІЙНИМИ КРОКАМИ НОСІЙНОЇ

В статті наведено результати дослідження когерентних послідовностей лінійно-частотно модульованих імпульсів сформованих з різними варіантами динаміки частоти носійного коливання. Даний тип сигналів можна застосовувати в вузькосмугових радіотехнічних системах. Наведено результати чисельного моделювання щодо залежності кореляційних властивостей даного типу сигналів від параметрів лінійної частотної модуляції окремих імпульсів і параметрів нелінійної модуляції частот парціальних носійних. Показано, що когерентні послідовності імпульсів з нелінійною частотною модуляцією кроків носійної між окремими імпульсами дозволяють значно знизити рівень прилеглих до центрального сплеску автокореляційної функції бокових пелюсток. Запропонована методика оптимізації параметрів модуляції послідовностей для мінімізації бокових пелюсток і міжсигнальної інтерференції в каналі.

Ключові слова: лінійна частотна модуляція, когерентна послідовність імпульсів, функція невизначеності, кореляційна функція, ґраткові пелюстки, міжсигнальна інтерференція.

I.I. CHESANOVSKIY

Academy of State Border Service of Ukraine, Khmelnytskyi

A.V. TKACHUK

Khmelnytsky National University

### SYNTHESIS OF COHERENT NONLINEAR STEPPED-FREQUENCY TRAIN OF NARROWBAND LINEAR FREQUENCY MODULATED PULSES

In order to attain high range resolution the wide bandwidth waveforms are commonly used. But when such wideband pulses are unavailable, high range resolution can still be achieved by coherent train of narrowband pulses by stepping the desired bandwidth from pulse to pulse. Range resolution is determined by the overall bandwidth, while the extended duration of the coherent sequence produces good Doppler resolution. The main advantage of such approach is that it achieves the large synthetic bandwidth while maintaining relatively small instantaneous system bandwidth. In most signals steps between pulses are equal (linear modulation of carrier frequency). But this approach suffers from high side lobes near main lobe and grating lobes in the range response. In order to assure the side lobes and grating lobes suppression, the main objective of this paper is to present synthesis of nonlinear stepped-frequency train of linear frequency modulated pulses. We discuss in detail how to optimize parameters of NLFM carrier steps between pulses in order to produce small side lobes near the main lobe. The principal advantages of this waveform are high range resolution, considerable reduction of side lobes level near main lobe with regard to linear frequency modulation steps waveforms, easily implementable transmitter due to constant envelope and small instantaneous bandwidth of pulses, and good interference mitigation. In addition, the nonlinear train has a spectrum weighting function inherently in modulation function which offers the advantage of high signal to noise ratio. The new design is also. На практиці виявилось що з розширенням смуги частот (збільшення бази сигналу  $B = 2T\Delta F$ ) значно зростає вага бокових пелюсток автокореляційної функції (АКФ), що призводить до посилення міжсигнальної (міжсимвольної і міжканальної) інтерференції. Так, для сигналів з ЛЧМ рівень першої бокової пелюстки досягає -13,5 дБ, що з практичної точки зору, є недопустимим для більшості радіосистем.

З розвитком теорії сигналів, було розроблено і досліджено багато різних систем сигналів (від одно- до  $n$ -мірних, дійсні і комплексні, дискретні і неперервні, тощо), що можуть успішно бути застосовані для різних радіотехнічних задач, при чому вирішувати ці задачі майже з оптимальною результативністю. Проте на базі частотно-модульованих сигналів розвинувся окремий вид «потенційно неоптимальних» сигналів – малобазисні сигнали ( $B \leq 100$ ). Потенційно, такі сигнали не можуть конкурувати з складними сигналами, проте існують напрями, особливо в радіолокації, де застосування широкосмугових сигналів є неможливим, або низькоєфективним і саме малобазисні сигнали можуть забезпечити найкращий результат. Основою формування малобазисних сигналів є імпульсні сигнали з частотною модуляцією (ЧМ) (дискретною чи неперервною), правильний вибір закону якої, є визначальним об'єктом досліджень в даній галузі.

В ряді останніх робіт [1, 2, 5] були запропоновані моделі дискретних частотно-модульованих сигналів (ДКЧМ), що представляють собою когерентну послідовність імпульсів з внутрішнім частотним рознесенням носійної. Такі послідовності дають змогу значно звузити ширину центрального сплеску що однозначно призводить до збільшення роздільної здатності в радіолокаційних системах. Крім того, такі послідовності, з огляду на парціальну частотну монотонність, дають змогу, за певних умов, використовувати вузькосмугові компоненти радіотрактів [2]. Проте, сигнали такого типу мають значний недолік, що полягає в жорсткому зв'язку параметрів окремих імпульсів з парціальним частотним

рознесенням. Зміст цього обмеження полягає в тому, що у випадку перевищення величини частотного рознесення несучої парціальних імпульсів  $\Delta f$  певного значення  $\Delta f \cdot T > 1$ , де  $T$  – тривалість імпульсу, виникають додаткові граткові пелюстки ФН (локальні сплески, обумовлені парціальним рознесенням частоти, взаємне розміщення яких має гратковий характер), що нівелюють вигоду від застосування частотного рознесення.

Одним із способів усунення цієї проблеми для даного класу сигналів є використання внутрішньоімпульсної ЛЧМ модуляції, але за умови дотримання певного строго визначеного вибору співвідношення між девіацією частоти в імпульсі і величиною частотних кроків несучої між імпульсами  $\Delta f$  [2–4]. Подібний метод боротьби з гратковими пелюстками вимагає сталого кроку рознесення частоти між імпульсами, по суті дискретної лінійної частотної модуляції. Але дослідження показують, що навіть значне послаблення граткових пелюсток, яке можна отримати зазначеними обмеженнями на вибір параметрів модуляції в імпульсах і несучої між ними, мало впливає на прилеглі до основного сплеску кореляційної функції бокові пелюстки, що накладає обмеження на ефективність і цього способу удосконалення ДКЧМ сигналів. Для зменшення рівня бокових пелюсток застосовують або «частково неузгоджену» фільтрацію, корегуючи АЧХ узгодженого фільтру відповідним ваговим вікном (втрачаючи у відношенні сигнал/шум), або використовують послідовності з надмірним «перекриттям» ЛЧМ між імпульсами, що зменшує ефективність сигналу, тому що вимагає більшої кількості імпульсів для забезпечення потрібної спектральної ширини.

Враховуючи ефект, що досягається лише застосуванням відносно примітивної схеми модуляції (лінійної), потенційні можливості ДКЧМ сигналів ще далеко не вичерпані і тому є очевидним, що пошук і застосування нелінійних схем модуляції може дати значний ефект в оптимізації даного типу сигналів.

**Постановка завдання**

Мета даної роботи полягає в синтезі і дослідженні когерентних послідовностей імпульсів із нелінійною парціальною ЧМ носійної для встановлення основних закономірностей впливу параметрів нелінійної модуляції на рівень прилеглих до основного сплеску кореляційної функції бокових пелюсток, також на рівень граткових пелюсток, ширину центрального сплеску, спектральну смугу сигналу та порівняння з аналогічними по роздільній здатності послідовностями з лінійною частотною модуляцією. Завданням було знайти такий спосіб модуляції когерентної послідовності, щоб зберігаючи сталу амплітуду імпульсів і залишаючи як можна меншою девіацію частоти всередині окремих імпульсів, добитись максимального зниження бокових пелюсток автокореляційної функції.

**Результати дослідження**

Потенційні можливості існуючих схем формування когерентних послідовностей імпульсів розглянемо на прикладі сигналів з парціальною ЧМ. На рис. 1 і рис. 2 показано форми самих сигналів і їх функції невизначеності. Відносна девіація частоти парціального імпульсу  $BT = 12,5$ , шпаркуватість 2,5.

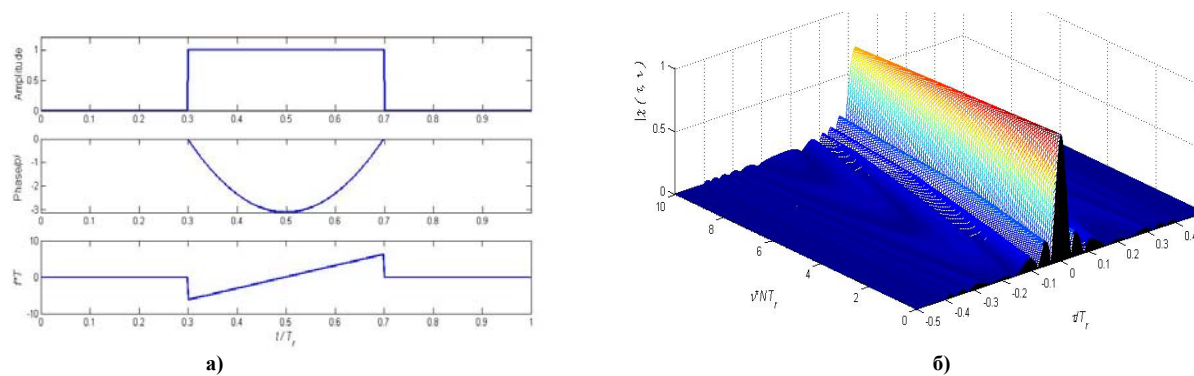


Рис. 1. Форма (а) і функція невизначеності парціального імпульсу (б)

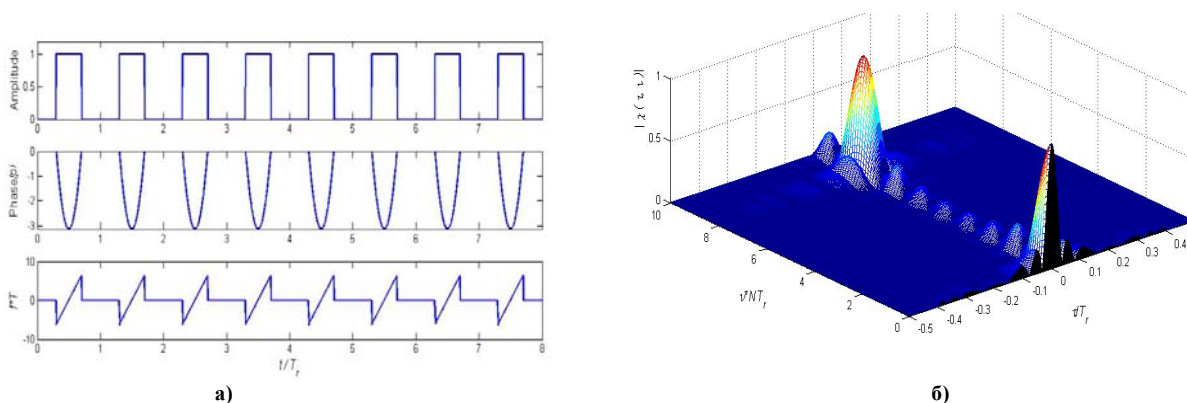


Рис. 2. Форма (а) і функція невизначеності когерентної послідовності імпульсів (б)

Аналізуючи отримані функції невизначеності можна виділити наступне. Як і передбачалось, парціальний імпульс має високий рівень бічних пелюсток (-13,5 дБ), обумовлений, в першу чергу, прямокутною формою амплітудної обвідної. Те саме розподілення в часовій області зберіглось і для послідовності когерентних імпульсів рис. 2 (так буде відбуватись якщо шпаркуватість  $T_r / T \geq 2$ ). Для покращення ФН в частотному розрізі необхідно застосовувати когерентну послідовність таких імпульсів. При цьому, за рахунок когерентності парціальних імпульсів досягається більша тривалість сигналу в часовій області, а відтак і значне покращення роздільної здатності послідовності відносно доплерівських зміщень. Як показано в [2], функція невизначеності когерентної послідовності  $\chi(\tau, \nu)$  пов'язана з функцією невизначеності парціального імпульсу  $\chi_T(\tau, \nu)$  формулою

$$|\chi(\tau, \nu)| = |\chi_T(\tau, \nu)| \left| \frac{\sin N\pi\nu T_r}{N \cdot \sin \pi\nu T_r} \right| \quad |\tau| \leq T \quad (1)$$

Як видно із наведеної залежності (1), перший нуль в частотному розрізі ( $\tau = 0$ ) функція невизначеності буде мати для доплерівського зміщення з частотою

$$\nu = \frac{1}{N \cdot T_r},$$

що також можна спостерігати і на рис. 2 (перший нуль за доплерівським зміщенням  $\nu N T_r = 1$ ).

Роздільна здатність імпульсу з ЛЧМ у часовому розрізі, визначається базою ЛЧМ парціального (окремого) імпульсу. Часова затримка, яка відповідає першому нулю центрального піка функції невизначеності приблизно дорівнює [2]

$$\tau_{zero} \approx \frac{1}{B}.$$

Для наведеного прикладу  $\frac{1}{B} = \frac{1}{BT} = \frac{1}{12.5 \cdot 2.5} T_r = 0.032 \cdot T_r$ . Очевидно, що для покращення роздільної здатності в часовому перерізі необхідно збільшувати базу парціальних сигналів, або скорочувати їх тривалість, що в більшості випадків є неможливим через обмеження в можливостях елементної бази.

Більш досконалою моделлю сигналу, що складається з когерентної послідовності імпульсів, може бути послідовність імпульсів із стрибками частоти між носійними (центральними) частотами кожного окремого імпульсу на певну величину  $\Delta f$ . Такий сигнал буде займати значно ширшу смугу частот (приблизно  $N \cdot \Delta f$ ), а відтак мати і кращу роздільну здатність в часовому перетині ФН ( $\tau \approx \frac{1}{N \cdot \Delta f}$ ). Крім того, широка смуга частот послідовності отримується при досить вузьких спектральних смугах окремих імпульсів. Формула для функції невизначеності такої послідовності ЛЧМ імпульсів з лінійним кроком частоти між ними була отримана аналітично в роботах [2, 3]

$$|\chi(\tau, \nu)| = \left| \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \text{sinc} \left[ T \left( \nu + B \frac{\tau}{T} \right) \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \right] \right| \cdot \frac{\sin \left\{ N\pi \left( \nu + \Delta f \left( \frac{\tau}{T} \right) \right) T_r \right\}}{N \sin \left\{ \pi \left( \nu + \Delta f \left( \frac{\tau}{T} \right) \right) T_r \right\}}, \quad |\tau| \leq T \quad (2)$$

тут  $B = |k + k_S|T$ , де  $k$  – коефіцієнт частотної модуляції ЛЧМ в імпульсі  $k = \frac{B}{T}$ ;  $k_S$  – коефіцієнт частотної модуляції між імпульсами  $k_S = \frac{\Delta f}{T_r}$ .

Для того, щоб отримати кореляційну функцію послідовності, визначимо переріз функції невизначеності (2) на частотній лінії  $\nu = 0$ :

$$|R(\tau)| = \left| \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \text{sinc} \left[ B\tau \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \right] \right| \cdot \left| \frac{\sin \{ N\pi\Delta f \tau \}}{N \sin \{ \pi\Delta f \tau \}} \right|, \quad |\tau| \leq T. \quad (3)$$

Тут функцію кореляції послідовності  $R(\tau)$  можна записати у вигляді добутку двох частин

$$R(\tau) = R_1(\tau) \cdot R_2(\tau),$$

де

$$|R_1(\tau)| = \left| \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \text{sinc} \left[ B\tau \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \right] \right| \quad |\tau| \leq T$$

співпадає з автокореляцією простого ЛЧМ імпульсу ( $B = |k + k_S|T$ ), а другий множник

$$|R_2(\tau)| = \left| \frac{\sin\{N\pi\Delta f \tau\}}{N \sin\{\pi\Delta f \tau\}} \right| \quad |\tau| \leq T \quad (4)$$

визначає положення додаткових ґраткових пелюсток навколо центрального сплеску. Ці пелюстки виникають у випадку, якщо  $\Delta f \cdot T > 1$ . Ґраткові пелюстки, як видно з вищенаведеної формули, будуть розташовуватись в точках з часовим зміщенням

$$\tau_{lobes} = \frac{g}{\Delta f} \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \lfloor T \cdot \Delta f \rfloor \quad |\tau| \leq T$$

Кількість таких пелюсток дорівнює  $\lfloor T \cdot \Delta f \rfloor$ , тобто найбільшому цілому числу, що не перевищує  $T \cdot \Delta f$  [3]. Ґраткові пелюстки можливо значно подавити шляхом певного, взаємопов'язаного вибору девіації ЛЧМ в кожному окремому імпульсі  $TB$  і кроку частоти між імпульсами  $T \cdot \Delta f$  [2–4]. Ідея полягає в тому, щоб нулі функції  $R_1(\tau)$  розташувати точно в місцях де знаходяться екстремуми ґраткових пелюсток, які визначаються множителем  $R_2(\tau)$ . Тоді автокореляційна функція (АКФ) послідовності імпульсів з внутрішньою ЛЧМ модуляцією і скачками частоти між ними  $-R(\tau)$ , що визначається формулою (3), буде позбавлена ґраткових пелюсток.

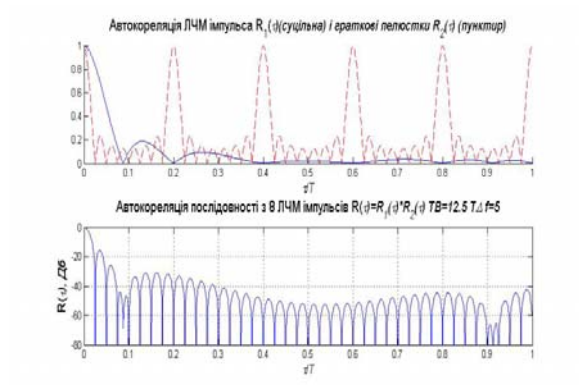


Рис. 3. АКФ послідовності з 8 імпульсів з внутрішньою ЛЧМ модуляцією  $TB = 12.5$  з кроком носійної  $T\Delta f = 5$

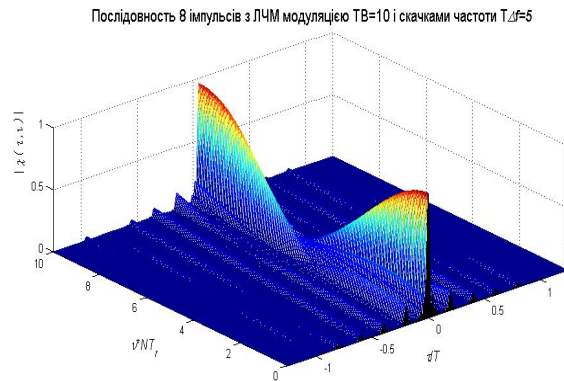


Рис. 4. ФН когерентної послідовності з 8 ЛЧМ імпульсів  $TB = 10$ ,  $T\Delta f = 5$  без компенсації ґраткових пелюсток

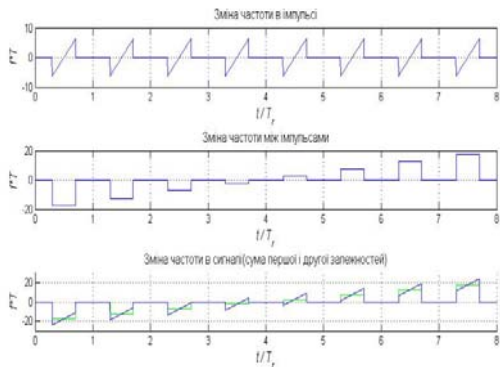


Рис. 5. Частотний розподіл в когерентній послідовності 8 імпульсів ЛЧМ  $TB = 12.5$  з скачками носійної між ними  $T\Delta f = 5$ ,  $T_f / T = 2.5$

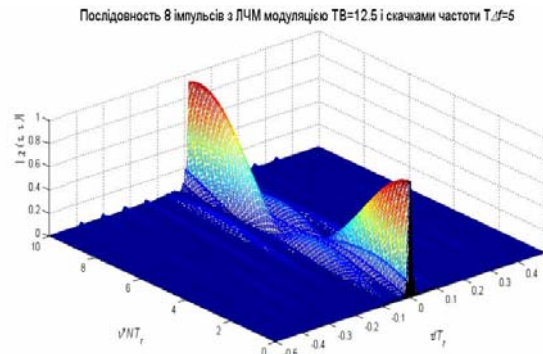


Рис. 6. Функція невизначеності когерентної послідовності 8 імпульсів ЛЧМ  $TB = 12.5$ ,  $T\Delta f = 5$  з компенсацією ґраткових пелюсток

В літературі часто в якості прикладу розглядається послідовність ЛЧМ імпульсів з кроком носійної  $T \cdot \Delta f = 5$  [2, 3]. Якщо в цій послідовності вибрати базу внутрішньої ЛЧМ модуляції  $TB = 12.5$  то ґраткові пелюстки будуть компенсовані нулями функції кореляції ЛЧМ імпульсу  $R_1(\tau)$ . На рис.3 зображені залежності розраховані у відповідності до формули (3) аналітично.

З наведених залежностей видно, що перший нуль імпульсу з ЛЧМ (і також послідовності імпульсів без стрибків несучої частоти між ними) знаходиться в точці  $\tau_{zero} \approx 1/B = 1/12.5 = 0.08 T$  (суцільна крива на першому графіку). Стрибки носійної між імпульсами дійсно значно звузили центральний сплеск до рівня  $\tau_{zero} \approx 1/N \cdot \Delta f = 1/8 \cdot 5 = 0.025 T$ .

Послідовність з 8 ЛЧМ імпульсів із лінійними стрибками носійної наведена на рис. 5, а функція невизначеності цієї послідовності на рис. 6. Порівнюючи ФН послідовності ЛЧМ імпульсів без стрибків носійної між імпульсами рис. 2 і зі стрибками частоти  $T \cdot \Delta f = 5$  (рис. 6) (масштаб однаковий), можна



помітити звуження центрального сплеску. Крім того, можна спостерігати також і набагато менший рівень граткових пелюсток рис.4. На рис.4 наведена ФН без точної компенсації граткових пелюсток. База ЛЧМ імпульсу  $TB=10$ , менше необхідної і нулі кореляційної функції ЛЧМ імпульсу не співпадають з максимумами граткових пелюсток. Оскільки  $T \cdot \Delta f = 5$ , то для такої послідовності кількість цих пелюсток (у відповідності з (4)) буде також 5.

Якщо ж повернутися до сигналу на рис. 5 і рис. 6, з точною компенсацією граткових пелюсток, то можна помітити дві характерні риси. По-перше, значно повільніший спад за доплерівським зміщенням, що є спільною рисою послідовностей із стрибками частоти між імпульсами. По-друге, високий рівень прилеглих бокових пелюсток. Вони не зникли, проте звужились. Їх можна бачити на рис. 3 (нижній графік) біля центрального сплеску, також на рис. 6 вони призводять до помітного розширення центрального сплеску ФН в нижній частині. На рис. 7 наведено АКФ такої послідовності у збільшеному масштабі.

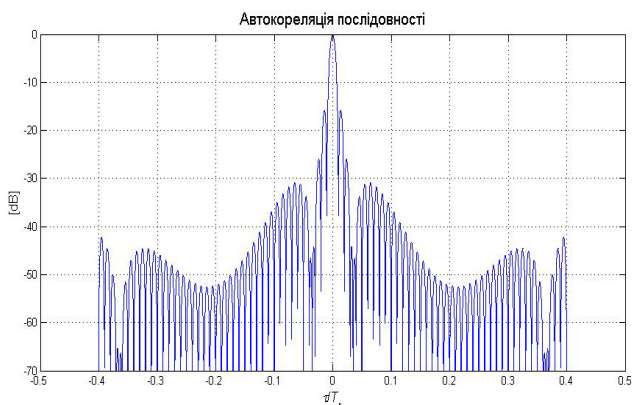


Рис. 7. Автокореляційна функція послідовності з 8 імпульсів з ЛЧМ модуляцією,  $TB=12.5$ ,  $T\Delta f = 5$ ,  $T_r/T=2.5$

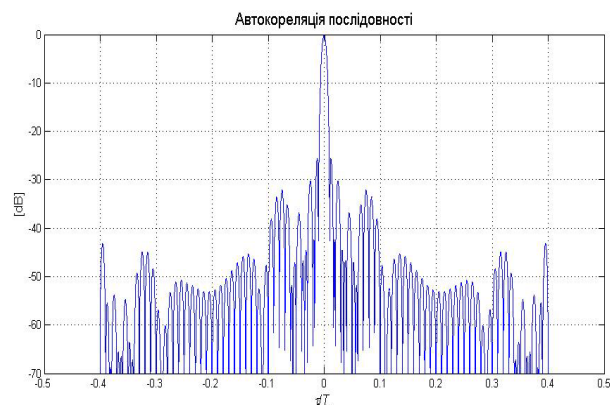


Рис. 8. Автокореляційна функція послідовності з 8 імпульсів з ЛЧМ модуляцією,  $TB=25$ ,  $T\Delta f = 5$ ,  $T_r/T=2.5$

Для зменшення цих прилеглих бокових пелюсток можна піти шляхом запропонованим в [2]. Для цього потрібно збільшити девіацію частоти в кожному імпульсі послідовності. Це призводить до зменшення ширини центрального сплеску АКФ окремого імпульсу зображеного на рис. 3 суцільною лінією, а відтак і до зменшення прилеглих до центрального сплеску пелюсток всієї послідовності рис. 8. Але оскільки когерентну послідовність імпульсів якраз і використовують з метою щоб при малій девіації частоти в імпульсі отримати більшу смугу частот всього сигналу, то при цьому збереження малої частотної бази окремого імпульсу важливе з точки зору практичного застосування сигналу. Тому, в даній статті розглядаються способи подавлення бокових пелюсток іншими методами, що не передбачають необмежене збільшення девіації частоти в окремих імпульсах. Оскільки можливість амплітудної корекції сигналів в даній роботі також не передбачається, то обраним шляхом зниження рівня прилеглих бокових пелюсток в часовій області є застосування нелінійної частотної модуляції а не ЛЧМ між імпульсами послідовності. При цьому, оперуючи параметрами та формою частотної модуляції можна оптимізувати ФН сигналу в часовому перетині.

Розглянемо можливість формування спектру всієї послідовності за рахунок нелінійних кроків частоти між імпульсами. Для того, щоб отримати нелінійний закон зміни кроків носійної між імпульсами, було обрано формулу нелінійної частотної модуляції Прайса (5). Порівняно з синтезованими залежностями, що розраховуються методом стаціонарної фази із спектральної густини потужності, яка сформована відповідно до форми деякого вікна, залежність Прайса задана аналітично і простіша в використанні [2].

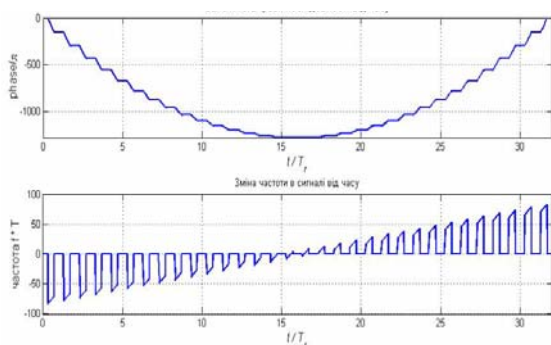


Рис. 9. Залежність фази і частоти від часу для послідовності  $N = 32$  імпульсів з внутрішньою ЛЧМ  $TB=12.5$  і лінійним кроком частоти між імпульсами  $T\Delta f = 5$ .

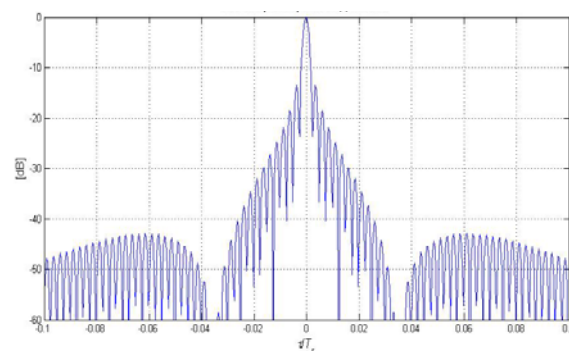


Рис. 10. Автокореляційна функція послідовності  $N = 32$  імпульсів з внутрішньою ЛЧМ  $TB=12.5$  і лінійним кроком частоти між імпульсами  $T\Delta f = 5$

$$f(t) = \frac{t}{T} \left( B_L + B_C \frac{1}{\sqrt{1 - 4 \frac{t^2}{T^2}}} \right) \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5)$$

Сигнал має лінійну частину з базою  $B_L$  і нелінійну з базою  $B_C$ . Біля середини імпульсу  $t = 0$  сигнал поводить себе як ЛЧМ з базою  $B_L + B_C$ , на краях головний вклад в девіацію належить нелінійному члену..

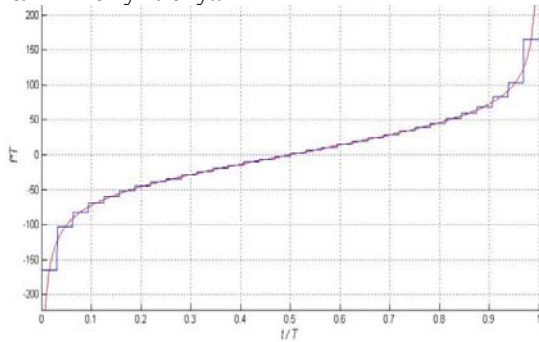


Рис. 11. Східчаста апроксимація функції Прайса  $n = 32$  сходами

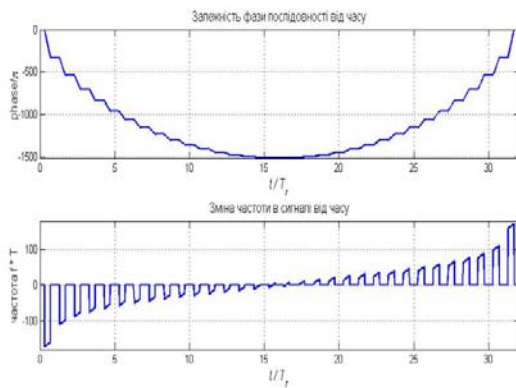


Рис. 12. Залежність фази і частоти від часу для послідовності  $N=32$  імпульсів з внутрішньою ЛЧМ  $TB=12.5$  і нелінійним кроком частоти між імпульсами

Для ілюстрації ефекту нелінійної модуляції носійної парціальних імпульсів, розглянемо дві послідовності з  $N = 32$  імпульсів. Перша відповідає лінійному кроку між імпульсами  $T \cdot \Delta f = 5$ , база імпульсів ЛЧМ  $TB = 12.5$  для точної компенсації граткових пелюсток. На рис. 9 наведено графіки залежності фази і частоти від часу, а на рис. 10 АКФ послідовності. Видно, що прилеглі пелюстки мають приблизно той же рівень, як і для ЛЧМ імпульсу  $-13.5$  дБ.

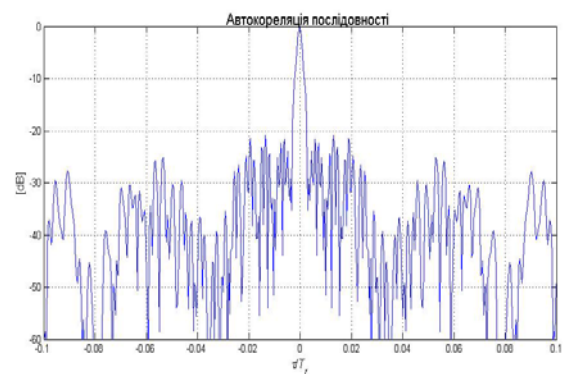


Рис. 13. Автокореляційна функція послідовності  $N=32$  імпульсів з внутрішньою ЛЧМ  $TB=12.5$  і нелінійним кроком частоти між імпульсами

Інша послідовність має ЛЧМ в кожному імпульсі з тією ж базою, але кроки частоти між імпульсами змінюються нелінійно. Для того, щоб задати нелінійні кроки частоти було обрано частотну залежність Прайса з параметрами  $B_L = 68$  і  $B_C = 68$  (неперервна лінія) рис. 11, яка була апроксимована 32 сходами.

Форми фазової і частотної функції сигналу модульованого отриманою апроксимацією наведена на рис.12, а його АКФ на рис.13. Якщо порівняти нижній графік, що демонструє залежність частоти від часу на рис. 9 з аналогічним на рис. 12, то на останньому видно нелінійний характер зміни кроків між імпульсами. Девіація частоти всієї послідовності також більша.

Для наочності результату параметри сигналів були обрані так, щоб ширина головного сплеску АКФ після оптимізації була однаковою і в послідовності з лінійним кроком частоти носійної і з нелінійним (саме тому було обрано такі значення параметрів  $B_L$  і  $B_C$ ). Якщо порівняти рис.10 і рис.13, то можна помітити підвищення віддалених бокових пелюсток і зменшення рівня прилеглих до центрального сплеску приблизно на  $-7$  дБ. Але цей результат є неоптимальним, тому що неоптимальним є дискретне наближення нелінійної функції Прайса, коли значення частоти кожної сходинок приймається рівним значенню в точці перетину неперервною залежністю середини сходинок рис. 11. Особливо чутливий рівень бокових пелюсток АКФ послідовності до кроків несучої частоти перших і останніх 5 імпульсів, де максимально проявляє себе нелінійність.

В результаті варіації значеннями  $B_C$ , чисельного моделювання і розв'язку оптимізаційної задачі, були визначені коригуючі коефіцієнти для східчастої апроксимації носійної частоти. Провівши корегування 5 перших (симетрично і для 5 останніх) імпульсів, ці кроки змінювались наступними коефіцієнтами: перший  $-0.61$ , другий  $-0.83$ , третій  $-0.91$ , четвертий  $-0.94$ , п'ятий  $-0.95$ . Отримана послідовність і її функція автокореляції наведені на рис. 14 і рис. 15.

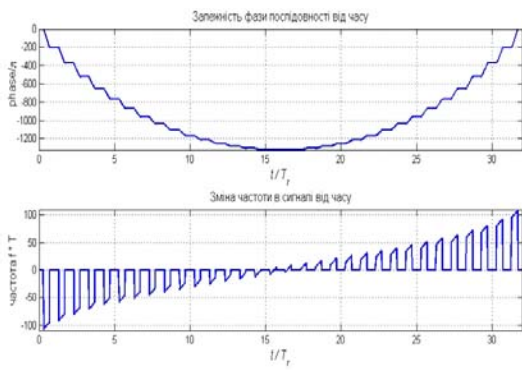


Рис. 14. Залежність фази і частоти від часу для послідовності N=32 імпульсів з внутрішньою ЛЧМ ТВ=12.5 і нелінійним кроком частоти між імпульсами і корекцією частоти

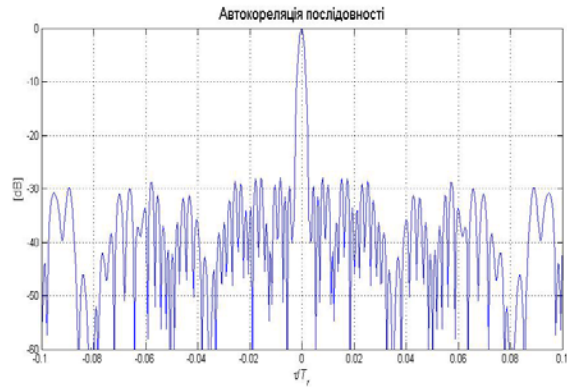


Рис. 15. АКФ послідовності N=32 імпульсів з внутрішньою ЛЧМ ТВ=12.5 і нелінійним кроком частоти між імпульсами і корекцією частоти

Порівнюючи рис. 15 і рис.10 видно, що рівень прилеглих бокових пелюсток зменшився від -13.5 дБ до -28 дБ. В той же час, до рівня -28 дБ піднялись більш віддалені пелюстки. Ширина головних автокореляційних сплесків однакова для обох послідовностей. З нижніх графіків на рис. 9 і 14 видно, що девіація частоти послідовності з нелінійними кроками більша, ніж для послідовності з лінійними кроками. Девіація збільшилась приблизно в  $100/77.5=1.3$  рази для того, щоб отримати ту ж ширину автокореляційного сплеска. Це є типовим явищем для НЛЧМ сигналів. Крім того, оптимізаційним корегуванням модуляційної функції вдається забезпечити додатковий вигреш по рівню бокових пелюсток щонайменше до -7 дБ рис. 13 і рис. 15.

На рис. 16 і рис. 17 наведено спектри послідовностей без корекції і з корекцією носійної частоти крайніх 5 імпульсів. Помітно, що спектр послідовності з корекцією набув більш округлої щільної форми, що і пояснює зниження бокових пелюсток. Спектр на рис. 16 відповідає сигналу, АКФ якого наведена на рис. 13. Видно, що значна нелінійність модулюючої функції частоти парціальних носійних (особливо в відношенні «крайніх» імпульсів) призводить до значного розширення спектру всієї когерентної послідовності.

На рис. 18 і рис. 19 наведені функції невизначеності двох сигналів, а на рис. 20 і рис. 21 перерізи цих функцій по рівню 0.1. Видно, що для когерентної послідовності з НЛЧМ кроками носійної імпульсів рис.19, прилегли до центрального піка сплески змістились в бік більших доплерівських частотних зміщень, центральний пік функції невизначеності зберігає свою ширину до рівня -28 дБ, що відповідає підвищеній роздільній здатності послідовності до цього рівня. Вигляд ФН типовий для імпульсу з НЛЧМ.

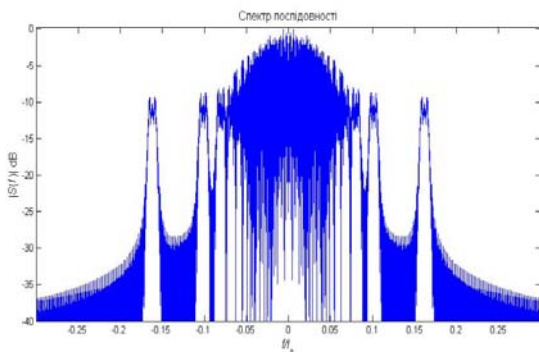


Рис. 16. Спектр послідовності з нелінійними кроками носійної імпульсів без оптимізації

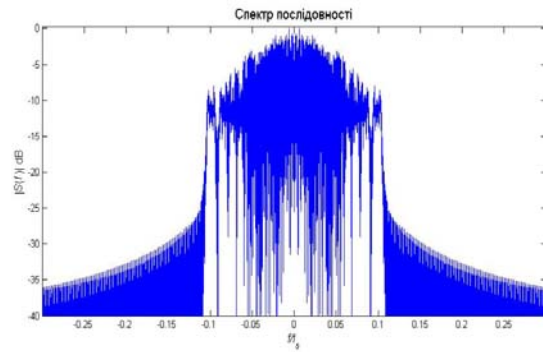


Рис. 17. Спектр послідовності з нелінійними кроками носійної імпульсів з оптимізацією крайніх 5 кроків

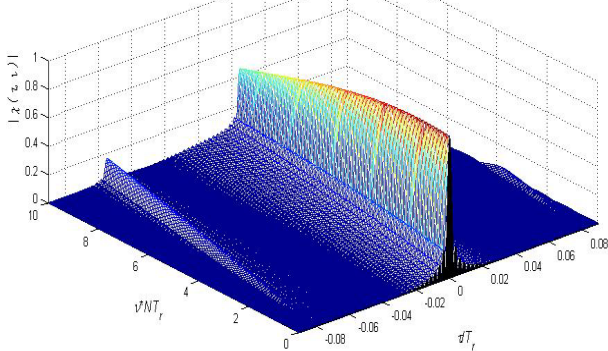


Рис. 18. ФН для послідовності з внутрішньою ЛЧМ ТВ=12.5 і лінійним кроком частоти між імпульсами  $\Delta f = 5$

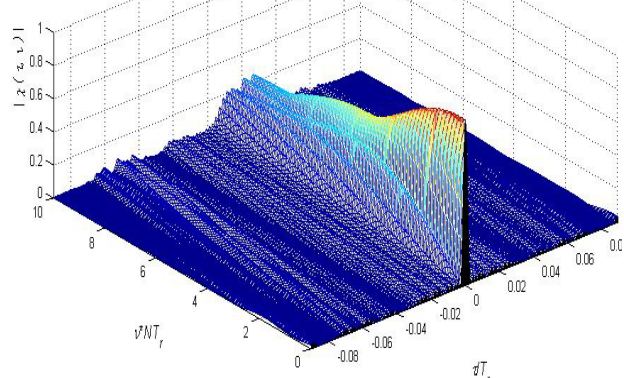


Рис. 19. ФН для послідовності з внутрішньою ЛЧМ ТВ=12.5 і нелінійним кроком носійної частоти імпульсів з корекцією



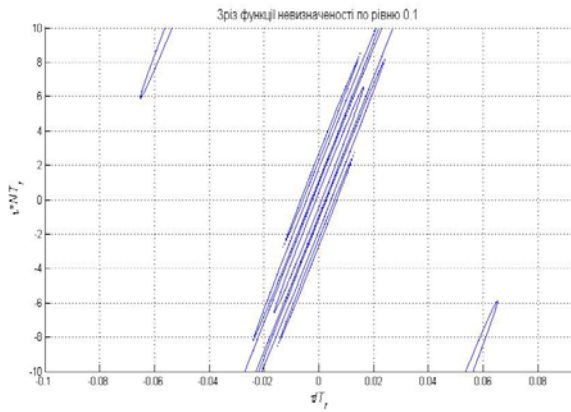


Рис. 20. Переріз функції невизначеності сигналу з ЛЧМ кроками носійної частоти по рівню 0.1

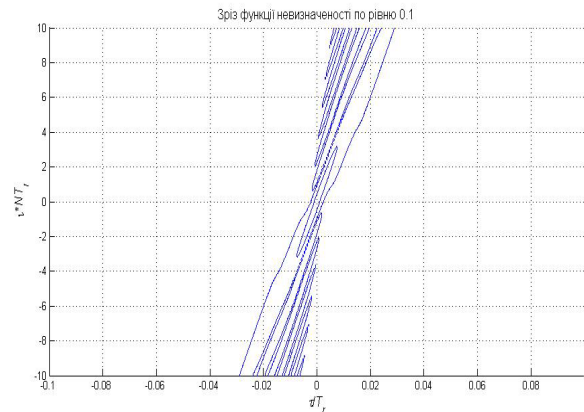


Рис. 21. Переріз функції невизначеності сигналу з НЛЧМ кроками носійної частоти по рівню 0.1

Варіація девіації частоти відповідно до нелінійного закону може обумовити певні труднощі при практичній реалізації через більшу в 1.3 раза частотну смугу, тому доцільно розглянути випадок, коли значення девіації частоти імпульсів з ЛЧМ модуляцією носійної зберігається для послідовності з НЛЧМ сталою. Очевидно, що це приведе до збільшення ширини центрального сплеску ФН і відповідного погіршення роздільної здатності. Коригуючі коефіцієнти останніх імпульсів ті ж самі, що і в попередній послідовності. На рис. 22 наведено залежність фази і частоти такої послідовності від часу, а на рис. 23 її АКФ. Із порівняння рис. 9 і рис. 22 видно, що девіація частоти послідовностей однакова. Центральний сплеск АКФ на рис. 23 має більшу ширину ніж на рис. 10 і рис. 16 приблизно на 25%. Рівень прилеглих пелюсток зменшився до -29.5 Дб

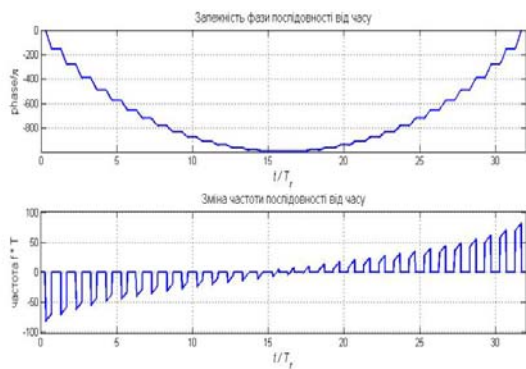


Рис. 22. Залежність фази і частоти від часу для послідовності з внутрішньою ЛЧМ  $T_B=12.5$  і нелінійним кроком частоти між імпульсами і корекцією частоти

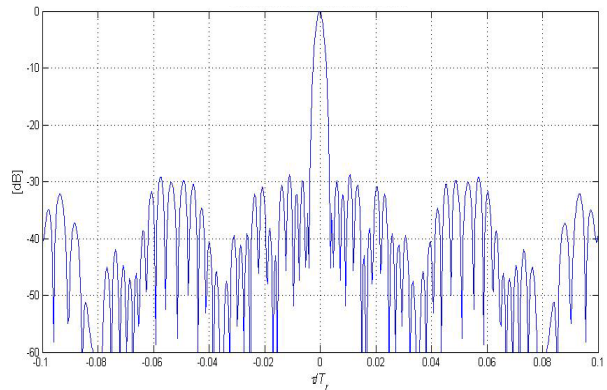


Рис. 23. АКФ послідовності  $N=32$  імпульсів з внутрішньою ЛЧМ і нелінійним кроком частоти між імпульсами і корекцією частоти

### Висновки

Когерентні послідовності ЛЧМ імпульсів з НЛЧМ модуляцією носійної парціальних імпульсів дають змогу будувати вузькосмугові системи зі значеннями показників ефективності на рівні широкосмугових систем. При частотній «компактності» кожного окремого імпульсу, когерентні послідовності з НЛЧМ кроками дозволяють не тільки збільшувати роздільну здатність, але володіють перевагами порівняно з послідовностями з ЛЧМ кроками носійної що полягають в значно меншому рівні прилеглих бокових пелюсток і у відсутності граткових пелюсток. Такий спосіб боротьби з прилеглими боковими пелюстками особливо підходить для послідовностей з великою кількістю імпульсів  $N \geq 32$ . Це забезпечує кращу роздільну здатність близьких об'єктів в радіолокації і кращі інтерференційні властивості в телекомунікаційних системах.

Отримані послідовності з НЛЧМ допускають просте безперервне масштабування смуги частот, якщо смуга зменшується, то при цьому рівень пелюсток не зростає, тільки буде розширюватись центральний сплеск автокореляції. Спектральна густина потужності послідовностей НЛЧМ формується без амплітудної модуляції і додаткової обробки вікнами опорного сигналу приймача, що дозволяє зберегти переваги узгодженої фільтрації і високе відношення сигнал/шум.

На прикладі сигналу з 32 імпульсів встановлено, що використовуючи оптимізовану послідовність кроків носійної, сформованої згідно з залежністю Прайса, можна знизити рівень бокових прилеглих пелюсток на 14.5 Дб від -13.5 Дб до рівня -28 Дб зберігаючи таку ж саму ширину центрального сплеску. При цьому загальний спектральна ширина збільшується в 1.3 раза. Якщо ж зберегти спектральну смугу сталою, то рівень бічних прилеглих пелюсток зменшиться до -29.5 Дб, але зростає ширина центрального сплеску АФ на 25%. Значний вииграш отримано за рахунок корекції кроків частоти носійної 5 крайніх імпульсів, де

максимальним чином проявляється нелінійність.

### Література

1. Кук Ч. Радиолокационные сигналы. / Ч. Кук, М. Бернфельд. – Москва : Советское радио, 1971. – 568 с.
2. Levanon N. Radar Signals / Nadav Levanon, Eli Mozeson. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2004. – 411 p.
3. Levanon N., Mozeson E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses / N. Levanon, E. Mozeson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2003. – Vol. 39. – № 2. – P. 694–703.
4. Gladkova I. Grating lobes suppression in stepped-frequency pulse train / I. Gladkova // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – DOI: 10.1109/TAES.2008.4667708.
5. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов / Л.Е. Варакин. – Москва : Советское радио, 1970. – 376 с.
6. Vizitiu I. Sidelobes reduction using synthesis of some NLFM laws / Iulian C. Vizitiu // Progress In Electromagnetics Research B. – 2013. – Vol. 49. – P. 301–318.

### References

1. Kuk CH. Radiolokatsionnyie signalyi. / CH. Kuk, M. Bernfeld. – Moskva : Sovetskoe radio, 1971. – 568 s.
2. Levanon N. Radar Signals / Nadav Levanon, Eli Mozeson. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2004. – 411 p.
3. Levanon N., Mozeson E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses / N. Levanon, E. Mozeson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2003. – Vol. 39. – № 2. – P. 694–703.
4. Gladkova I. Grating lobes suppression in stepped-frequency pulse train / I. Gladkova // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – DOI: 10.1109/TAES.2008.4667708.
5. Varakin L.E. Teoriya slojnyih signalov / L.E. Varakin. – Moskva : Sovetskoe radio, 1970. – 376 s.
6. Vizitiu I. Sidelobes reduction using synthesis of some NLFM laws / Iulian C. Vizitiu // Progress In Electromagnetics Research B. – 2013. – Vol. 49. – P. 301–318.

Рецензія/Peer review : 3.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

А.О. БЕРЕЗА, Т.В. ГРИЩУК, В.В. КОВТУН  
Вінницький національний технічний університет

## ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СЕАНСУ РОЗПІЗНАВАННЯ ОСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Автори пропонують метод оцінювання надійності сеансу розпізнавання особи автоматизованою системою розпізнавання мовця критичного застосування (АСРМКЗ), який, на відміну від існуючих, використовує Баєсівську мережу, яка описує зв'язки між оцінкою сеансу розпізнавання, згенерованою класифікатором АСРМКЗ, встановленим у системі значенням порогу правдоподібності, оцінками надійності сеансу розпізнавання та оцінками впливу основних збурюючих факторів на мовний сигнал, що дозволяє за рахунок притаманних Байєсівській мережі (БМ) властивостей проводити оцінювання надійності сеансу розпізнавання в умовах часткової невизначеності згаданих параметрів та досягти заданого значення показника якості системи розпізнавання, ідентифікувавши ненадійні сеанси розпізнавання. Авторами синтезували базову та уточнену Байєсівські мережі для оцінювання надійності сеансів розпізнавання мовців за даними тестувальної вибірки, які відрізняються тим, що в уточненій БМ параметр надійності виражено залежною від оцінок рівня присутніх у мовному сигналі збурень змінною, тоді як базова БМ є більш універсальною та потребує меншої кількості обчислень.

**Ключові слова:** автоматизована система розпізнавання мовців критичного застосування, надійність, імовірнісна оцінка, сеанс розпізнавання.

A.O. BEREZA, T.V. GRISHCHUK, V.V. KOVTUN  
Vinnytsia National Technical University

### ESTIMATION OF THE RELIABILITY OF A PERSON RECOGNITION SESSION BY AN THE AUTOMATIC SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE

The authors propose a method for an estimation of the reliability of a person recognition session by an automatic speaker recognition system of critical use (ASRSCU) that, unlike existing ones, uses the Bayesian network (BN), which describes the relationships between the evaluation of the recognition session generated by the ASRSCU classifier, system likelihood threshold value, estimates of the reliability of the recognition session, and estimates of the influence factors with are in the speech signal, which, due to the inherent Bayesian se properties, allow an estimation of the reliability of test session under partial uncertainties of said parameters and achieve a predetermined quality indicator to identify unreliable recognition sessions. The authors synthesized the basic and refined Bayesian networks for an estimation of the reliability of speaker recognition sessions based on test sample data, which differ in that in the refined BN the reliability parameter is expressed by the variable-dependent influence factors, while the base BN is more universal and requires less the number of calculations.

**Keywords:** automatic speaker recognition system of critical use, reliability, probabilistic estimation, person recognition session.

### ВСТУП

Незважаючи на велику кількість методів обробки мовних сигналів, які застосовуються у сучасних системах розпізнавання мовця взагалі та використовувалися авторами при створенні автоматизованої системи розпізнавання мовця критичного застосування (АСРМКЗ) [1] зокрема, імовірною є ситуація коли ступінь збурення парольного мовного сигналу у фонограмі виявляється завеликим для розпізнавання особи мовця із прийнятною якістю. Неможливість детектування таких наперед ненадійних спроб розпізнавання призводить до різкого падіння якісних показників роботи АСРМКЗ і в цілому унеможливує її критичне застосування. Існування методу адекватної оцінки надійності сеансу розпізнавання мовця дозволило б визначити необхідність проходження мовцем повторного сеансу розпізнавання, підвищуючи таким чином надійність системи розпізнавання в цілому.

На даний час проведено ряд досліджень [2–4] щодо комбінування різних джерел помилок систем розпізнавання образів у вигляді узагальненої якісної міри, використовуючи яку можна було б автоматизувати процес визначення порогу достовірності рішень, які приймаються класифікатором системи розпізнавання. Один з перспективних підходів, який застосовується для оцінювання надійності систем розпізнавання мови [5,6], оснований на використанні Баєсової мережі (Bayesian network, БМ) для імовірнісного оцінювання надійності сеансу розпізнавання за визначеними якісними показниками. Відзначимо, що згадані дослідження проведені для оцінювання надійності систем розпізнавання мови, які принципово відрізняються від систем розпізнавання мовця. Останні для прийняття рішень використовують інформацію яка персоніфікує мовні сигнали. Також відкритим є питання оптимальної конфігурації Баєсової мережі та достатньої множини факторів, що впливають на надійність сеансу розпізнавання мовця.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою наведених у статті досліджень є створення методу оцінювання надійності сеансу розпізнавання мовця на основі аналізу якісних оцінок, нормативні значення яких визначаються як на етапі навчання систем, так і при аналізі отриманого під час сеансу розпізнавання мовного сигналу, представленого у вигляді фонограмми. Складність такої задачі оцінювання надійності полягає у комплексній структурі об'єкту дослідження, який включає в себе мовні сигнали, результати їх оцінювання класифікатором системи розпізнавання щодо належності до класу кожного із зареєстрованих у системі осіб-мовців, остаточний результат, прийнятий системою розпізнавання, та тип і ступінь збурень, присутніх у

мовному сигналі. Отже, задачею дослідників є створення моделі для оцінювання надійності сеансу розпізнавання мовця, здатної підтримувати результативність процесу оцінювання надійності в умовах часткової невизначеності враховуваних параметрів, вибір та введення у модель можливості врахування збурюючих факторів, присутніх у мовному сигналі, та емпіричне дослідження адекватності створеного математичного апарату.

### ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ АСРМКЗ

Згідно із стандартом ISO/IEC 19795-6:2012 [7] працеспроможність біометричних систем розпізнавання, до яких можна віднести і АСРМКЗ, оцінюється насамперед за такими показниками як імовірність помилкового допуску (False Acceptance Rate, ПД) – імовірність несанкціонованого допуску (помилка першого роду), виражена у відсотках кількості допусків системою неавторизованих осіб, і імовірність помилкового недопуску (False Rejection Rate, ПНД) – імовірність помилкового затримання (помилка другого роду), виражена у відсотках кількості відмов у допуску системою авторизованим особам. Параметри ПД і ПНД взаємопов'язані і змінюючи пороги ПД і ПНД можна варіювати чутливість біометричної системи, щоб вона з більшою імовірністю пропускала зареєстрованих осіб, але при цьому зростатиме і імовірність пропуску системою і незареєстрованих осіб. Результати тестування системи розпізнавання згідно [8] можуть представитися у вигляді графіка робочої характеристики, яка є параметрично заданою кривою порога прийняття рішень. На такому графіку по вісі абсцис відкладаються оцінки імовірностей помилкового допуску ПД, а по вісі ординат – оцінки імовірностей помилкового недопуску ПНД. Для більшої наочності для осей використовують шкалу нормального відхилення [9] (іноді логарифмічну або іншу шкалу). Такий спосіб представлення результатів у задачі біометричної ідентифікації одержав назву кривої компромісного визначення помилки (Detection Error Trade-off curve, КВП крива). Кожна точка КВП кривої відповідає отриманим емпірично помилкам 1-го і 2-го роду при фіксованому порозі прийняття рішень готової до експлуатації системи розпізнавання. Для представлення результатів оцінок системи розпізнавання у вигляді єдиного параметра використовується коефіцієнт рівного рівня помилок (Equal Error Rate, РРП), рівний значенню імовірності помилок при такому рівні порогу прийняття рішень, при якому імовірності помилок помилкового допуску ПД і помилкового недопуску ПНД збігаються або найбільш близькі за значенням. Також в статті використовується такий специфічний для систем розпізнавання мовця параметр як функція помилки детектування (Detection cost function, ФПД) з вкрай високою вартістю помилкового пропуску нецільового мовця:  $\text{ФПД} = \text{ПНД} + 549 \cdot \text{ПД}$ . Надалі ми будемо оперувати мінімальним ( $\text{minФПД}$ ) і фактичним ( $\text{actФПД}$ ) значеннями функції помилки детектування в точці прийняття рішення, для визначення яких будується КВП крива, на якій параметру  $\text{minФПД}$  відповідає значення функції вартості помилки з оптимальним порогом, а параметру  $\text{actФПД}$  – значення функції вартості помилки з порогом, встановленим вручну.

Основним джерелом помилок АСРМКЗ за умови достатньої розмірності факторного простору для персоналізації фонограм мовців є збурення мовного сигналу. Отже, визначимо множину показників, які б дозволили врахувати ці збурення при оцінюванні надійності сеансу розпізнавання мовця АСРМКЗ. Очевидно, що присутній у фонограмі із записом мовного сигналу шум негативно впливає на ефективність розпізнавання мовця. В даній роботі для оцінювання рівня відношення сигнал/шум (ВСШ) ми використовуватимемо метод основний на аналізі періодичних властивості інтервалів мовлення. Основна енергія мовного сигналу концентрується в околі частоти основного тону мовця, тоді як енергія шуму не детермінована у частотному просторі. Цей факт дозволяє оцінювати рівень ВСШ сигналу використовуючи банки смугових фільтрів  $H_s$  та  $H_n$  відповідно:

$$H_s(z, t) = \frac{0.5z^{T_p(t)} + 1 + 0.5z^{-T_p(t)}}{1 - a_s z^{-T_p(t)}}, \quad H_n(z, t) = \frac{0.5z^{T_p(t)} + 1 + 0.5z^{-T_p(t)}}{1 - a_n z^{-T_p(t)}}, \quad (1)$$

де  $T_p(t)$  – період основного тону в момент часу  $t$ , а  $a_s$  і  $a_n$  – модифікатори пропускнув спроможності фільтрів. Емпірично виявлено найбільш універсальні значення модифікаторів  $a_s = 0.25$  і  $a_n = 0.7$ . Для оцінювання параметрів основного тону використовується авторський метод [10]. Отже, використовуючи (1) ми оцінюємо рівень ВСШ аналізуючи розподіл енергії сигналу у частотному просторі із подальшим усередненням значення рівня ВСШ для всіх мовних фрагментів вхідної фонограми.

Іншим використаним авторами індикатором збурень мовних сигналів є коефіцієнт модуляції у момент часу  $t$  визначається із співвідношення

$$KM(t) = \frac{v_{\max}(t) - v_{\min}(t)}{v_{\max}(t) + v_{\min}(t)}, \quad (2)$$

де  $v(t)$  – це обвідна сигналу, а  $v_{\max}(t)$  і  $v_{\min}(t)$  – її локальні максимум і мінімум в околі часу  $t$ . Обвідна апроксимує абсолютні значення мовного сигналу, після зниження частоти його дискретизації до 60 Гц, як виконувалося у [11]. Передбачається, що із зростанням рівня ВСШ у фонограмі зростатиме і кількість локальних мінімумів її обвідної, знижуючи відповідно до (2) значення коефіцієнта модуляції. Далі ми усереднюватимемо значення коефіцієнта модуляції для кожної аналізованої фонограми.

Комплектним індикатором наявності у мовному сигналі збурень слугує спектральна ентропія, яка визначається шляхом інтерпретування короткочасного спектру як розподілу імовірності однієї дискретної випадкової величини  $X$  із подальшим обрахунком ентропії розподілу. Спектральний розподіл визначається шляхом нормалізації значень короткочасного спектра:

$$p_X(f) = \frac{e(f)}{\sum_{k=1}^N e(k)}, \quad (3)$$

де  $e(f)$  – спектральна енергія для частоти  $f$ ,  $p_X$  – це спектральний розподіл. Розширюючи вираз (3) на  $t$ -й фрейм фонограми отримаємо такий вираз для обчислення спектральної ентропії:

$$H(t) = -\sum_{k=1}^N p_{X_t}(k) \log(p_{X_t}(k)). \quad (4)$$

Логічним виглядає міркування, що гармонійна структура мовного сигналу знижуватиме значення показника (4), а зростання рівня ВСШ призводитиме до збурення структури мовного сигналу і зростання значення показника (4) відповідно. Далі ми усереднюватимемо значення спектральної ентропії для кожної аналізованої фонограми.

Також оцінювати рівень збурень у мовному сигналі передбачається за допомогою моделей гаусових сумішей (Gaussian Mixture Model, МГС) і універсальної фонової моделі (Universal Background Model, УФМ) зокрема. УФМ – це модель гаусових сумішей, яка представляє імовірнісний розподіл особливостей процесу мовотворення осіб-мовців, фонограми яких містилися у навчальній вибірці. Фактично УФМ містить еталони мовців, на розпізнавання яких було навчено АСРМКЗ. Фонограми із вищим рівнем ВСШ матимуть суттєвішу відмінність від еталонів, збережених у УФМ, отже, рівень правдоподібності, визначений класифікатором при порівнянні аналізованої фонограми із даними УФМ може використовуватися для оцінювання якості цієї фонограми.

#### МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ АСРМКЗ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЄСОВОЇ МЕРЕЖІ

Для оцінювання підсумкової міри надійності тестування АСРМКЗ із врахуванням якісних оцінок фонограм тестувальної вибірки автори пропонують використовувати Баєсівську мережу (Bayesian network, БМ), яка моделюватиме взаємодію між випадковими величинами, задіяними у процесі розпізнавання мовців. Баєсівська мережа – це імовірнісна графічна модель, яка представляє множину випадкових змінних та множину умовних залежностей, з ними пов'язаних, у вигляді орієнтованого ациклічного графу. Вершини графу, який відповідає створюваній БМ, представляють випадкові змінні у Байєсовому сенсі. Це можуть бути спостережувані величини, латентні змінні, невідомі параметри або гіпотези тощо. Ребра графу представляють умовні залежності об'єкту моделювання, зокрема, відсутність з'єднання між вершинами графу означає умовну незалежність змінних, які цим вершинам відповідають. Кожній вершині відповідає функція імовірності, яка перетворює отримані на вході вершини значення від батьківських вершин у імовірність (або розподіл імовірності) змінної, яку представляє ця вершина, що і є виходом цієї вершини.

Автори обрали саме математичний апарат БМ для моделювання надійності тестування АСРМКЗ тому, що оскільки БМ є замкненою моделлю змінних та їх взаємозв'язків, то її можна використовувати для отримання відповідей на імовірнісні запити стосовно них, тобто мережу можна використовувати для уточнення даних про стан певної підмножини змінних при наявності даних спостережень (evidence) щодо інших змінних. Такий процес обчислення апостеріорного розподілу змінних для заданого свідчення називають імовірнісним висновком (probabilistic inference), який дає універсальну достатню статистику для висновку, чи потрібно підбирати значення досліджуваної підмножини змінних, які мінімізують певну цільову функцію, що моделює імовірність помилково прийнятих АСРМКЗ рішень.

На рисунку 1, а) показано графічне представлення базової БМ, створеної для оцінювання надійності прийнятих АСРМКЗ рішень на основі фонограм тестувальної вибірки. Незафарбовані вершини відповідають латентним змінним, а зафарбовані – змінним, які спостерігаються. Зафарбованим вершинам меншого розміру відповідають детермінованим параметрам. Напрявлені дуги між вершинами вказують на наявність умовної залежності між змінним, які відповідають зв'язним вершинам. Опишемо змінні, що відповідають вершинам БМ. Нехай  $\hat{s}_i$  – оцінка АСРМКЗ  $i$ -ї фонограми із тестувальної вибірки, а  $Q_i$  – результати якісної оцінки цієї ж фонограми.  $\theta_i = \{T, N\}$  – індикаторна змінна сеансу розпізнавання мовця за  $i$ -ю фонограмою, де  $T$  – гіпотеза про те, що  $i$ -ї фонограма тестувальної вибірки відповідає певній фонограмі навчальної вибірки, задовольняючи порог правдоподібності АСРМКЗ, а  $N$  – гіпотеза, супротивна вищеописаній.  $\hat{\theta}_i$  – це прийняте АСРМКЗ рішення по  $i$ -ї фонограмі із врахуванням значення порогу правдоподібності  $\xi_\theta$ . Змінна  $R_i \in \{R, U\}$  описує надійність сеансу розпізнавання за  $i$ -ю фонограмою, де  $R$  – гіпотеза про те, що прийняте АСРМКЗ рішення надійне, а  $U$  – гіпотеза, супротивна вищеописаній. Значення  $\pi_\theta = (P_T, P_N)$  описують апіорні імовірності  $P_T$  і  $P_N$ , коли виконуються гіпотези  $T$  і  $N$  стосовно змінної  $\theta$  відповідно, при чому  $P_N = 1 - P_T$ . Змінні  $\pi_R = (P_R, P_U)$  описують апіорні імовірності  $P_R$  і  $P_U$ , коли виконуються

гіпотези  $R$  і  $U$  стосовно змінної  $R$  відповідно, при чому  $P_R = 1 - P_U$ .

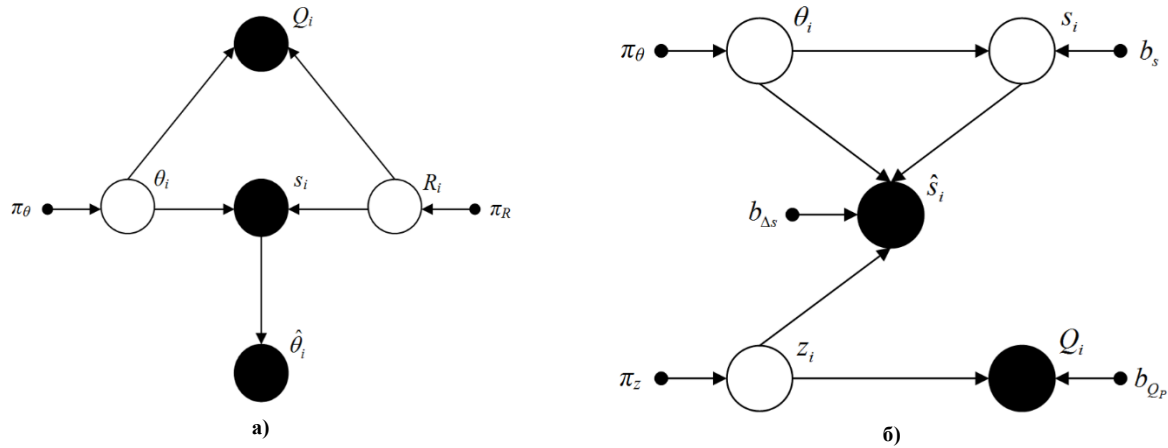


Рис. 1. Архітектура Бассовських мереж оцінювання надійності АСРМКЗ: а) базова БМ, б) уточнена БМ

За своїм призначенням БМ дозволяє сформулювати узагальнений імовірнісний розподіл вищеписаних змінних, що відповідають її вершинам, у вигляді рівняння

$$P(\hat{s}, Q, R, \theta, \hat{\theta} | \pi_\theta, \pi_R) = P(\hat{s} | R, \theta) P(Q | R, \theta) P(\hat{\theta} | R, \theta) P(\theta | \pi_\theta) P(R | \pi_R), \quad (5)$$

використовуючи яке можна отримати апостеріорну імовірність розподілу  $R$  в залежності від значень змінних, які спостерігаються, так:

$$P(R | \hat{s}, Q, \hat{\theta}, \pi_\theta, \pi_R) = \frac{\sum_{\theta \in \{T, N\}} P(\hat{s}, Q, R, \theta, \hat{\theta} | \pi_\theta, \pi_R)}{\sum_R \sum_{\theta \in \{T, N\}} P(\hat{s}, Q, R, \theta, \hat{\theta} | \pi_\theta, \pi_R)}. \quad (6)$$

Розподіл імовірності  $P(\hat{s} | R, \theta, \hat{\theta})$  описується УФМ, а  $P(Q | R, \theta)$  – МГС, а імовірність

$$P(\hat{\theta} | \theta, R) \text{ визначається як } P(\hat{\theta} | \theta, R) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{\theta} = \theta \vee R_i = R \wedge \hat{\theta} = \theta \vee R_i = U, \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

У сформульованій вище структурі БМ зв'язок між  $\theta$  і  $Q$  описує припущення що на фонограми навчальної і тестувальної вибірок збурюючи фактори впливали по різному. Запропонована у вигляді БМ модель оцінювання надійності АСРМКЗ за якістю тестувальних фонограм здійснює оцінювання надійності на основі показників оцінки АСРМКЗ і індикатора якості фонограм. Якщо ми бажаємо виконувати оцінювання надійності без урахування показника  $s_i$ , то можна видалити відповідну вершину із БМ та видалити з (5) імовірність  $P(s | R, Q)$ .

Графічно уточнену Бассівську мережу для оцінювання надійності АСРМКЗ представлено на рисунку 1, б). На відміну від базової БМ у ній присутні вершини  $s_i$  та  $z_i$  і здійснено описані далі перепозначення, зокрема,  $\hat{s}_i$  – це оцінка АСРМКЗ  $i$ -ї фонограми, отриманої за реальних умов експлуатації (тобто за присутності у мовному сигналі збурень, спричинених впливом навколишнього середовища), а  $s_i$  – це оцінка АСРМКЗ  $i$ -ї фонограми, у якій збурення відсутні. Змінні зв'язані між собою залежністю  $\hat{s}_i = s_i + \Delta s$ . Зазвичай значення змінної  $s_i$  невідоме, але якщо у навчальній вибірці є інформація про вид та ступінь збурень присутніх фонограм, то значення  $s_i$  можна визначити на етапі навчання БМ. Змінна  $z_i$  описує якісний стан. Це вектор, який містить елементи  $z_{ik}$ ,  $k=1, \dots, K$ , які описують ступінь збурення мовного сигналу у тестовій фонограмі відповідно до вказаних вище типів збурень. Звичайно, змінні  $z_i$  і  $\Delta s$  зв'язані. Множини вхідних параметрів  $b_s = \{\mu_s, \Lambda_s\}$ ,  $b_{\Delta s} = \{\mu_{\Delta s}, \Lambda_{\Delta s}\}$  і  $b_{Q_P} = \{\mu_{Q_P}, \Lambda_{Q_P}\}$  пов'язані із використанням математичного апарату МГС для представлення мовних сигналів у просторі ознак і описують параметри функцій щільності розподілу (вектор математичного сподівання  $\mu$  і коваріаційну матрицю  $\Lambda$ ) представлення об'єктів, які описуються змінними  $s$ ,  $\Delta s$  і  $Q_P$  відповідно. Отже, апостеріорну імовірність  $s$  в контексті МГС можна описати так:

$$P(s|\hat{s}, Q) = \sum_{\theta \in \{T, N\}} \sum_{k=1}^K P(\theta, z_k = 1 | \hat{s}, Q) N\left(s \left| \mu'_{s_{k\theta}}, \Lambda_{s_{k\theta}}^{-1} \right.\right), \quad (7)$$

де

$$\Lambda'_{s_{k\theta}} = \Lambda_{\Delta s_{k\theta}} + \Lambda_{s_\theta}, \quad (8)$$

$$\mu'_{s_{k\theta}} = \Lambda_{s_{k\theta}}^{-1} \left( \Lambda_{\Delta s_{k\theta}} (\hat{s} - \mu_{\Delta s_{k\theta}}) + \Lambda_{s_\theta} \mu_{s_\theta} \right). \quad (9)$$

Ваги суміші визначаються як

$$P(\theta, z_k = 1 | \hat{s}, Q) = \frac{P(\hat{s} | \theta, z_k = 1) P(Q | z_k = 1) P(\theta) \pi_{z_k}}{\sum_{\theta \in \{T, N\}} \sum_{k=1}^K P(\hat{s} | \theta, z_k = 1) P(Q | z_k = 1) P(\theta) \pi_{z_k}}, \quad (10)$$

$$P(\hat{s} | \theta, z_k = 1) = N\left(\hat{s} \left| \mu'_{s_{k\theta}}, \Lambda_{s_{k\theta}}^{-1} \right.\right), \quad (11)$$

$$\Lambda'_{s_{k\theta}} = \Lambda_{s_\theta} \Lambda_{s_{k\theta}}^{-1} \Lambda_{\Delta s_{k\theta}}, \quad (12)$$

$$\mu'_{s_{k\theta}} = \mu_{s_\theta} + \mu_{\Delta s_{k\theta}}. \quad (13)$$

Зв'язки між змінними удосконаленої БМ описується такими співвідношеннями:

$$P(s | \theta) = N\left(s \left| \mu_{s_\theta}, \Lambda_{s_\theta}^{-1} \right.\right), \quad (14)$$

$$P(\hat{s} | s, z_k = 1, \theta) = N\left(\hat{s} \left| s + \mu_{\Delta s_{k\theta}}, \Lambda_{\Delta s_{k\theta}}^{-1} \right.\right), \quad (15)$$

$$P(Q | z_k = 1) = N\left(Q \left| \mu_{Q_k}, \Lambda_{Q_k}^{-1} \right.\right), \quad (16)$$

$$P(z) = \prod_{k=1}^K \pi_{z_k}. \quad (17)$$

У базовій БМ надійність сеансу розпізнавання за  $i$ -ю фонограмою описано окремою змінною  $R_i$ , тоді як в уточненій БМ цей показник у явному вигляді відсутній і визначається опосередковано, способом, описаним далі. У типових системах розпізнавання мовця рішення щодо особи мовця  $\hat{\theta}$  приймається системою із урахуванням значення порогу правдоподібності  $\xi_\theta$  у вигляді оцінки  $\hat{s}$ . Щоб визначитися із достовірністю прийнятого АСРМКЗ щодо особи мовця рішення використовуємо БМ для оцінювання апостеріорного розподілу  $s$  із урахуванням прийнятої системою оцінки та результату якісної оцінки вхідної фонограми у вигляді  $P(s|\hat{s}, Q)$ , що дозволяє оцінити надійність прийнятого АСРМКЗ рішення так:

$$P(R_i = R | \hat{s}, Q) = \begin{cases} P(s > \xi_\theta | \hat{s}, Q), & \text{якщо } \hat{\theta} = T, \\ P(s < \xi_\theta | \hat{s}, Q), & \text{якщо } \hat{\theta} = N. \end{cases} \quad (18)$$

На рис. 2 наведено приклади розподілу результатів оцінки АСРМКЗ, які потім використовувалися для обчислення апостеріорної імовірності показника надійності  $R_i$  при відомому значенні якісного стану  $z$ . Сині криві описують розподіл оцінки для тестових фонограм без збурень, червоні криві описують розподіл оцінки для тестових фонограм із збуреннями, а зафарбований фрагмент під зеленою кривою обмежує частку надійних тестових випробувань із урахуванням сформульованого вище математичного апарату. Розміри зафарбованого фрагменту дозволяють однозначно стверджувати, що уточнена БМ потенційно набагато чутливіша за базову, що, проте, необхідно підтвердити емпірично.

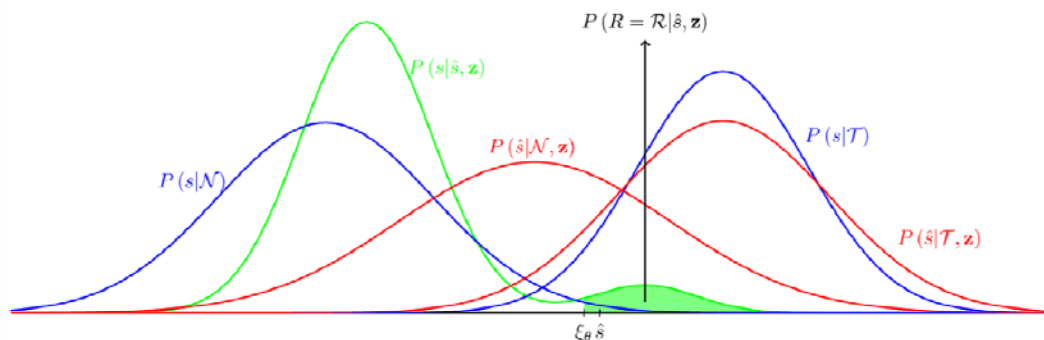


Рис. 2. Розподіл оцінки АСРМКЗ при обчисленні  $P(R_i \in R | \hat{s}, z_k = 1)$



### ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для емпіричних досліджень запропонованих БМ оцінювання надійності сеансів автоматизованого розпізнавання мовців автори використали створену у [11] АСРМКЗ, у якій застосовувалося і-векторне представлення фонограм із нейромережевим класифікатором. Фонограми представлялися у просторі ознак 400-мірними і-векторами, на основі 20 МГ-кепстральних коефіцієнтів та їх перших та других похідних і 2048-елементної діагональної коваріаційної УФМ матриці. Передобробка фонограм включала центрування, передфільтрацію та нормування тривалості звучання фонограм.

В якості бази фонограм для формування навченої і тестувальної вибірок використовувалася база записів із безкоштовної бази даних NOIZEUS [10] – спеціалізованої бази даних Школи інжинірингу та комп’ютерних наук Еріка Джонсона при Університеті Техасу в Далласі, США, яка використовується для дослідження алгоритмів покращення звуку і складається з 30 речень англійської розмовної мови, вимовлених трьома чоловіками та трьома жінками (по 5 на кожного мовця, частота дискретизації записів складає 25 кГц, але задля додавання шуму була зменшена до 8 кГц) та записів типових побутових та техногенних шумів, які можна підмішувати до незбурених мовних сигналів у довільний спосіб. При формуванні вибірки для навчання БМ до її складу включено фонограми із різним рівнем ВСШ та різними видами техногенних шумів для кожного мовця.

Спочатку параметр оцінки АСРМКЗ калібрувався методом лінійної логарифмічної регресії із використанням Bosaris Toolkit [4] на основі лише фонограм без збурень із навчальної вибірки. Далі відкалібрована АСРМКЗ виконувала операцію розпізнавання мовців із тестувальної вибірки, у якій були присутні фонограми із рівнем ВСШ у 0, 5, 10, 15 дБ, при встановленому рівні Байєсового порогу прийняття рішень у 2.29. Загалом результативність розпізнавання мовців за фонограмами із рівнем ВСШ у 0 дБ становила РРП = 2.2%, minФПД = 0.14 і астФПД = 0.17, а середні значення цих показників при розпізнаванні мовців за всіма фонограмами із тестувальної вибірки склали minФПД = 0.99 і астФПД = 2.96 при тому, що при значенні показника астФПД більше одиниці система розпізнавання вважається ненадійною. Отже, покращити результативність досліджуваної АСРМКЗ пропонується шляхом виявлення фонограм, які найбільш впливають на значення показника астФПД, і проаналізувавши умови, за яких вони були записані, визнати в подальшому ненадійними сеанси розпізнавання, у фонограмах яких спостерігаються ідентифіковані спотворення, значення яких перевищує встановлений рівень.

Враховуючи контрольованість процесу навчання БМ із відомими характеристиками фонограм навчальної вибірки, можна точно встановити кількість фонограм без збурень, визначити значення параметру  $S$  для кожної фонограми навчальної вибірки із відомим ступенем збурень, і встановити значення параметру  $Z$  в залежності від даних про рівень ВСШ навчальної та тестувальної фонограм для відповідних мовців:

$Z = (SNR_{irm}, SNR_{ist})$ . Встановивши значення цих параметрів можна обчислити розподіли  $\Delta S$  для кожної пари рівнів ВСШ і  $\theta$ ,  $P(\Delta S | \theta, SNR_{irm}, SNR_{ist})$ . Проведені обчислення

$P(\Delta S | \theta, SNR_{irm}, SNR_{ist})$  виявили ряд залежностей, а саме, якщо із двох фонограм одна з яких не містить збурень, а у другій вони присутні, і якщо сеанс розпізнавання визнано надійним, то середнє значення  $\Delta S$  спадає із зростанням ступеня збурень, а якщо сеанс розпізнавання визнано ненадійним, то середнє значення  $\Delta S$  повільно зростає із ступенем збурень; якщо із двох фонограм обидві збурені незначно, то якщо сеанс розпізнавання визнано надійним, то середнє значення  $\Delta S$  прямує до 0, а якщо сеанс розпізнавання визнано ненадійним, то прямує до  $\infty$ ; якщо із двох фонограм обидві збурені суттєво, то якщо сеанс розпізнавання визнано надійним, то середнє значення  $\Delta S$  повільно зменшується, а якщо сеанс розпізнавання визнано ненадійним, то середнє значення  $\Delta S$  стрімко зростає. Skorиставшись цими правилами можна емпірично оцінювати значення параметра  $Z$  для вхідної фонограми, аналізуючи її фрагменти, і по результатам оцінювання робити висновок щодо надійності процедури розпізнавання на її основі.

Skorиставшись сформульованими вище правилами проведено експеримент по виявленню залежності між кількістю визнаних ненадійними сеансів розпізнавання і показником астФПД, результати якого представлені на рисунку 3.

Наведені на рисунку 3 залежності отримано при варіюванні пороговим значенням апостеріорної

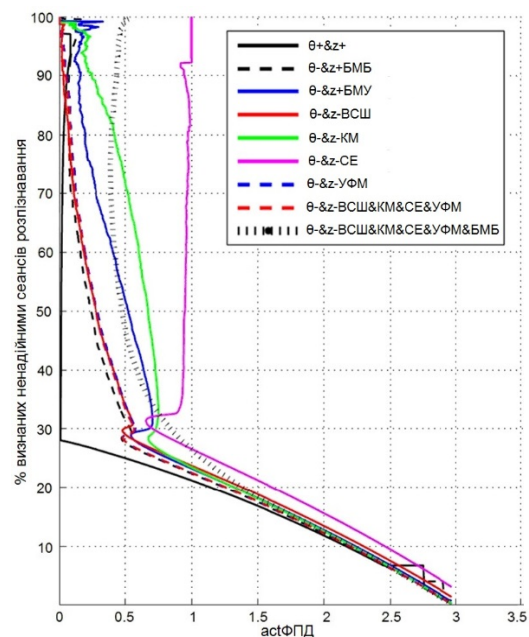


Рис. 3. Залежність між показником астФПД і кількістю визнаних базовою і уточненою БМ ненадійними сеансів розпізнавання при різних початкових умовах



імовірності  $P(R|\hat{s}, Q)$ , обчислюваної за відношенням (18). Кращою вважається залежність, яка забезпечує вище значення астФПД відкидаючи меншу кількість випробувань. Рішення щодо визнання сенсу розпізнавання ненадійним приймалося на основі оцінок як базової так і уточненої БМ при різних початкових умовах, вставляваних варіюванням параметрами  $\theta$  та  $z$ . Спочатку отримуємо оцінки БМ за умови, що значення змінних  $\theta$  та  $z$  відомі. При такому припущенні множина гаусіан, описуваних рівнянням (7), вироджується до єдиної функції – цей гіпотетичний сценарій дозволяє нам оцінити рівень нижньої межі показника астФПД для досліджуваної АСРМКЗ. Як видно з рисунку (крива  $\theta+z$ ), за таких початкових умов можна звести значення астФПД майже до нуля, відкидаючи близько 30% сеансів розпізнавання. Далі розглядаємо випадок, коли змінна  $\theta$  невідома, а значення змінної  $z$  є детерміновані, тобто відомі рівні спотворень для фонограм як навчальної, так і тестувальної вибірок. За таких умов суміш (7) міститиме два гаусіани із вагами-імовірностями  $P(\theta|\hat{s}, z_k = 1)$ . Отримані при таких початкових умовах результати (криві  $\theta+z$ БМБ для базової і  $\theta+z$ БМУ для уточненої БМ) показують погіршення значення астФПД, але меншу кількість визнаних ненадійними сеансів розпізнавання порівняно із попередніми дослідженнями. Розглянемо нарешті найхарактерніший для типових систем розпізнавання мовця випадок, для якого величини  $\theta$  і  $z$  невідомі. За такої початкової умови розподіли  $P(Q|z_k = 1)$  опишемо діагональними та взаємоковаріаційними матрицями комбінації збурюючих факторів, описаних відношеннями (1)-(4). Отримані результати (крива  $\theta+z$ -ВСШ для уточненої БМ і при окремо варіюваному рівні ВСШ,  $\theta+z$ -КМ – для уточненої БМ і при окремо варіюваному коефіцієнті модуляції,  $\theta+z$ -СЕ – для уточненої БМ і при окремо варіюваній спектральній ентропії,  $\theta+z$ -УФМ – для уточненої БМ і при окремо варіюваному відхиленні від УФМ,  $\theta+z$ -ВСШ&КМ&СЕ&УФМ – для уточненої БМ і варіюванні значеннями всіх збурюючих факторів,  $\theta+z$ -ВСШ&КМ&СЕ&УФМ&БМБ – для базової БМ і варіюванні значеннями всіх збурюючих факторів) показують, що найбільшу кількість визнаних ненадійними сеансів розпізнавання при збереженні прийняттого рівня астФПД отримано при варіюванні значенням коефіцієнту модуляції, за яким йде рівень ВСШ, а спектральна ентропія і логарифмічний поріг правдоподібності УФМ виявляється малоінформативним. Загалом, для всіх проведених дослідів базова БМ виявилася менш інформативною за уточнену, використовуючи інформацію від якої вдалося зменшити значення астФПД з 2.96 до 0.72, 0.27 та 0.09 при визнанні ненадійними 25, 50 або 75% сеансів розпізнавання із врахуванням всіх збурюючих факторів.

## ВИСНОВКИ

У даній статті запропоновано новий метод оцінювання надійності сенсу розпізнавання особи автоматизованою системою розпізнавання мовця критичного використання, який, на відміну від існуючих, використовує Байєсівську мережу, яка описує зв'язки між оцінкою сенсу розпізнавання, згенерованою класифікатором АСРМКЗ, встановленим у системі значенням порогу правдоподібності, оцінками надійності сенсу розпізнавання та оцінками впливу основних збурюючих факторів на мовний сигнал, що дозволяє за рахунок притаманних Байєсівській мережі властивостей проводити оцінювання надійності сенсу розпізнавання в умовах часткової невизначеності згаданих параметрів та досягти заданого значення показника якості системи розпізнавання ідентифікувавши ненадійні сеанси розпізнавання.

Запропоновані авторами теоретичні результати знайшли свого емпіричного підтвердження при аналізі результатів роботи АСРМКЗ, параметри чутливості якої було відкалібровано на даних навчальної вибірки. До складу тестувальної вибірки були включені фонограми із різним видом та ступенем збурень, серед яких враховувалися такі показники, як рівень відношення сигнал/шум, коефіцієнт модуляції, спектральна ентропія та ступінь відхилення параметрів паролного мовного сигналу від значень цих же параметрів, узагальнених на етапі навчання системи у вигляді універсальної фонові моделі. Автори запропонували базову та уточнену Байєсівські мережі для оцінювання надійності сеансів розпізнавання мовців за даними тестувальної вибірки, які відрізняються тим, що в уточненій БМ параметр надійності виражено залежною від оцінок рівня присутніх у мовному сигналі збурень змінною, тоді як базова БМ є більш універсальною та потребує меншої кількості обчислень.

Використовуючи універсальний показник якості систем розпізнавання мовців астФПД проведено комплексне дослідження ефекту від використання отриманої від БМ інформації при винесенні вердикту щодо надійності сеансів розпізнавання, результати якого показали, що базова БМ виявилася менш інформативною за уточнену, використовуючи інформацію від якої вдалося зменшити значення астФПД з 2.96 до 0.72, 0.27 та 0.09 при визнанні ненадійними 25, 50 або 75% сеансів розпізнавання із врахуванням всіх збурюючих факторів, при тому, що працеспроможною визнається система розпізнавання, значення показника астФПД якої перевищує одиницю. Також результати експерименту показують, що найбільшу кількість визнаних ненадійними сеансів розпізнавання при збереженні прийняттого рівня астФПД отримано при зростанні значень коефіцієнту модуляції, за яким йде рівень ВСШ, а спектральна ентропія і логарифмічний поріг правдоподібності УФМ виявилися малоінформативними для запропонованого методу оцінювання надійності.

## Література

1. Kovtun V.V. Research of neural network classifier in speaker recognition module for automated system of critical use / Mykola M. Bykov, Viacheslav V. Kovtun, Andrzej Smolarz, Mukhtar Junisbekov, Aliya Targeusizova, Maksabek Satymbekov // SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 1044521. – DOI: 10.1117/12.2280930.
2. Huggins M.C., Grieco J.J. Confidence metrics for speaker identification [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/613d/7b60da94100d152f38611cd1ea9fd42056e3.pdf>
3. Campbell W. M. Estimating and evaluating confidence for forensic speaker recognition / W. M. Campbell, D. A. Reynolds, J. P. Campbell // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 23-23 March 2005: proceedings. – Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. – P. 4117–4120. – DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1415214
4. Solewicz Y., Koppel M. Considering Speech Quality in Speaker Verification Fusion [Electronic resource]. Access mode: [http://www.isca-speech.org/archive/archive\\_papers/interspeech\\_2005/i05\\_2189.pdf](http://www.isca-speech.org/archive/archive_papers/interspeech_2005/i05_2189.pdf)
5. Richiardi J. A probabilistic measure of modality reliability in speaker verification / J. Richiardi, P. Prodanov, A. Drygajlo // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 23-23 March 2005: proceedings. – Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. – P. 2154–2160. – DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1415212
6. Richiardi J. Speaker Verification with Confidence and Reliability Measures / J. Richiardi, A. Drygajlo, P. Prodanov // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 14–19 May 2006: proceedings. – Toulouse, France: IEEE, 2006. – P. 1238–1242. – DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1660102
7. ISO/IEC 19795-6:2012(en) Information technology – Biometric performance testing and reporting — Part 6: Testing methodologies for operational evaluation. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:19795:-6:ed-1:v1:en>
8. The NIST Year 2012 Speaker Recognition Evaluation Plan [Electronic resource]. Access mode: [http://www.nist.gov/itl/iad/mig/upload/NIST\\_SRE12\\_evalplan-v17-r1.pdf](http://www.nist.gov/itl/iad/mig/upload/NIST_SRE12_evalplan-v17-r1.pdf)
9. Navratil J., Klusacek D. On linear DETs [Electronic resource]. Access mode: [http://www.research.ibm.com/CBG/papers/icassp07\\_navratil.pdf](http://www.research.ibm.com/CBG/papers/icassp07_navratil.pdf)
10. Ковтун В.В. Оптимізація алфавіту інформативних ознак для автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного застосування / А.О. Береза, М.М. Биков, А.Д. Гафурова, В.В. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2017. – № 3(249). – С. 222–228.
11. Ковтун В.В. Метод представлення ознак у автоматизованій системі розпізнавання мовця критичного застосування / М.М. Биков, В.В. Ковтун, М.С. Фурман // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 5(253). – С. 112–120.

## References

1. Kovtun V.V. Research of neural network classifier in speaker recognition module for automated system of critical use / Mykola M. Bykov, Viacheslav V. Kovtun, Andrzej Smolarz, Mukhtar Junisbekov, Aliya Targeusizova, Maksabek Satymbekov // SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 1044521. – DOI: 10.1117/12.2280930.
2. Huggins M.C., Grieco J.J. Confidence metrics for speaker identification [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/613d/7b60da94100d152f38611cd1ea9fd42056e3.pdf>
3. Campbell W. M. Estimating and evaluating confidence for forensic speaker recognition / W. M. Campbell, D. A. Reynolds, J. P. Campbell // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 23-23 March 2005: proceedings. – Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. – P. 4117–4120. – DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1415214
4. Solewicz Y., Koppel M. Considering Speech Quality in Speaker Verification Fusion [Electronic resource]. Access mode: [http://www.isca-speech.org/archive/archive\\_papers/interspeech\\_2005/i05\\_2189.pdf](http://www.isca-speech.org/archive/archive_papers/interspeech_2005/i05_2189.pdf)
5. Richiardi J. A probabilistic measure of modality reliability in speaker verification / J. Richiardi, P. Prodanov, A. Drygajlo // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 23-23 March 2005: proceedings. – Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. – P. 2154–2160. – DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1415212
6. Richiardi J. Speaker Verification with Confidence and Reliability Measures / J. Richiardi, A. Drygajlo, P. Prodanov // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 14–19 May 2006: proceedings. – Toulouse, France: IEEE, 2006. – P. 1238–1242. – DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1660102
7. ISO/IEC 19795-6:2012(en) Information technology – Biometric performance testing and reporting — Part 6: Testing methodologies for operational evaluation. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:19795:-6:ed-1:v1:en>
8. The NIST Year 2012 Speaker Recognition Evaluation Plan [Electronic resource]. Access mode: [http://www.nist.gov/itl/iad/mig/upload/NIST\\_SRE12\\_evalplan-v17-r1.pdf](http://www.nist.gov/itl/iad/mig/upload/NIST_SRE12_evalplan-v17-r1.pdf)
9. Navratil J., Klusacek D. On linear DETs [Electronic resource]. Access mode: [http://www.research.ibm.com/CBG/papers/icassp07\\_navratil.pdf](http://www.research.ibm.com/CBG/papers/icassp07_navratil.pdf)
10. Kovtun V.V. Optymizatsiia alfavitu informatyvnykh oznak dlia avtomatyzovanoi systemy rozpoznavannia movtsiv krytychnoho zastosuvannia / А.О. Береза, М.М. Биков, А.Д. Гафурова, В.В. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2017. – № 3(249). – С. 222–228.
11. Kovtun V.V. Metod predstavleniia oznak u avtomatyzovani systemy rozpoznavannia movtsia krytychnoho zastosuvannia / М.М. Биков, В.В. Ковтун, М.С. Фурман // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 5(253). – С. 112–120.

Рецензія/Peer review : 2.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Бісікало О.В.

О.Ю. МЄШКОВ

Херсонський національний технічний університет

Д.М. БАРАНОВСЬКИЙ

Вінницький національний технічний університет

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТЕРІЮ АУТЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ НА ОСНОВІ ЛОКАЛІЗОВАНИХ СТРУКТУР ГОЛОСОВОГО СИГНАЛУ

У статті розглянуто розроблений автором критерій аутентифікації особистості. Даний критерій базується на локалізованих структурах голосового сигналу людини, які формуються у просторі характеристик «частота-структура». Охарактеризовано спосіб побудови даних структур та визначення їх геометричних параметрів. Визначено критерій аутентифікації особистості як відношення площі перекриття локалізованих структур аналізованого сигналу до площі базової локалізованої структури диктора. Визначено основні показники аутентифікації для даного методу та проаналізовано їх динаміку.

Ключові слова: голосовий сигнал, аутентифікація, критерій аутентифікації, локалізовані структури, персоніфікований голосовий еталон.

O.YU. MIESHKOV

Kherson National Technical University

D.M. BARANOVSKIY

Vinnytsia National Technical University

## DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF PERSONAL AUTHENTICATION CRITERIA BASED ON THE LOCALIZED VOICE SIGNAL STRUCTURES

An author's developed personal authentication criteria is given in the article. This criterion is based on the localized human voice signal structures that are formed in the characteristics space "frequency-structure". The method for these structures formation and their geometric parameters definition is characterized. The personal authentication criterion is defined as a cross-area ratio of the analyzed signal localized structures and the basic localized structure of the person. Main authentication parameters for this method are defined and their dynamics are analyzed. Selection of previously unsettled parts of the general problem. In our opinion, the unsolved problem is the development of the criterion of personality authentication by voice signal, which would allow to carry out this procedure with minimal computational complexity. It is also important to conduct a study of the features of this criterion, taking into account the dynamics of the human voice signal, which is used as the basis of this criterion. Formulating the purpose of the study. The purpose of the article is the development and experimental study of the criterion of identity authentication based on localized structures of the human voice signal. During the study, the criteria for personal authentication by voice were developed. This criterion involves the construction of localized structures in the space of the characteristics of the voice signal. Preliminary processing and allocation of these characteristics is performed on the basis of algorithms previously developed by the author. The geometric peculiarities of constructing localized structures in the characteristics space are determined for reducing the computational complexity of the authentication procedure. The authentication criterion is defined as the average value of the particle area of the localized structures of all phonemes that have fallen into the base areas of the corresponding phonemes. The dynamics of the developed authentication criterion based on FAR and FRR authentication indicators was studied. It is determined that over time the value of the developed criterion is stabilized at the level of 0.7, however for the authentication task it is expedient to set it at the level of 0.8-0.85. However, given the significant dynamics of the voice signal as an authentication base, it is advisable to update personalized voice standards with a frequency of 28-30 days.

Keywords: voice signal, authentication, authentication criteria, localized structures, personified voice standard.

**Постановка проблеми.** Для розв'язання задачі голосової аутентифікації на сьогоднішній день використовується велика кількість різних методів, на основі яких будується сучасне програмне забезпечення. У більшості методів з голосового сигналу виділяється ряд характеристик і на основі порівняння їх з певними еталонами приймається аутентифікаційне рішення. При цьому важливим моментом є саме критерій аутентифікації, на основі якого проводиться порівняння вхідного та базового сигналу та винесення рішення про вдалу аутентифікацію чи відмову у ній.

У роботах [1, 2, 3] розглянуто та описано методи первинної обробки та виділення характеристик голосового сигналу, необхідних для побудови системи аутентифікації. Також у даних роботах наведено опис критерію, який може використовуватись для задачі аутентифікації. Однак використання даного критерію потребує експериментального дослідження та визначення його адекватних значень. Тому дослідження критерію аутентифікації особистості за голосом є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженню процедур голосової аутентифікації та аналізу голосового сигналу приділяли значну увагу вітчизняні та зарубіжні вчені, зокрема: Я.П. Драган, А.П. Кравченко, Е.Г. Жиляков, Г.Є. Ляшенко, Є.А. Первушин, Д.С. Голубинський, Е.В. Булгакова, Г. Фант, Дж. Фланган, Л.Р. Рабінер, Т. Матсуї та інші [4–6]. В основному їх дослідження спрямовані на розробку методів дослідження голосових сигналів та побудову систем аутентифікації у частотному просторі, що передбачає значну попередню обробку сигналу з метою виділення необхідних характеристик. Тому розробка сучасних методів, які передбачають проведення процедури аутентифікації у часовому просторі у режимі реального часу на основі критерію аутентифікації з мінімальним обсягом обчислень є доволі актуальною.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** На наш погляд, невирішеною

залишається проблема розробки критерію аутентифікації особистості за голосовим сигналом, який би дозволяв проводити дану процедуру з мінімальною обчислювальною складністю. Також важливим є проведення дослідження особливостей даного критерію з урахуванням динамічності голосового сигналу людини, який використовується як основа даного критерію.

**Формування мети дослідження.** Метою статті є розробка та експериментальне дослідження критерію аутентифікації особистості на основі локалізованих структур голосового сигналу людини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У дослідженні [3] запропоновано критерій аутентифікації особистості за структурами, утвореними у просторі характеристик голосового сигналу. У вказаній роботі ці структури названі хмарними з огляду на їх візуальну подібність до хмар, а не до хмарних обчислювальних структур. Тому, з урахуванням того, що кожна вокалізована ділянка голосового сигналу локалізується у певній частині простору характеристик, більш логічно називати їх локалізованими структурами голосового сигналу. Таке визначення буде використовуватись надалі.

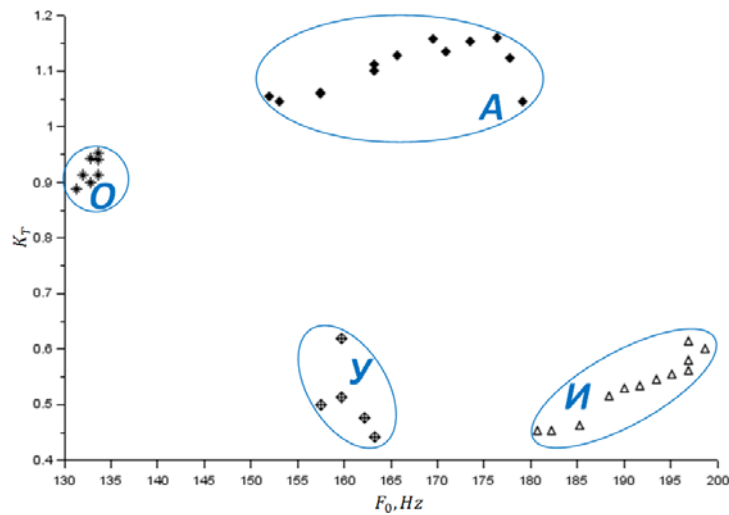


Рис. 1. Приклад локалізованих структур голосового сигналу у просторі характеристик

Виділення даних локалізованих структур базується на алгоритмах обробки голосового сигналу, описаних у роботах [1, 2].

Запропонований критерій аутентифікації передбачає попереднє формування бази персоніфікованих голосових еталонів. Для цього 60 дикторами було виконано акустичний запис паролльної фрази «Справи ідуть добре». Диктор вимовляє паролльну фразу у довільному стані, сидячи на стільці, тримаючи голову рівно. Запис паролльної фрази проводився у 5 сесій по дві вимови паролльної фрази послідовно. Інтервал між сесіями складав 15–20 хвилин. У результаті цього формувалися доволі широкі локалізовані структури для кожної з аналізованих фонем – «А», «И», «У» та «О» (рис. 2).

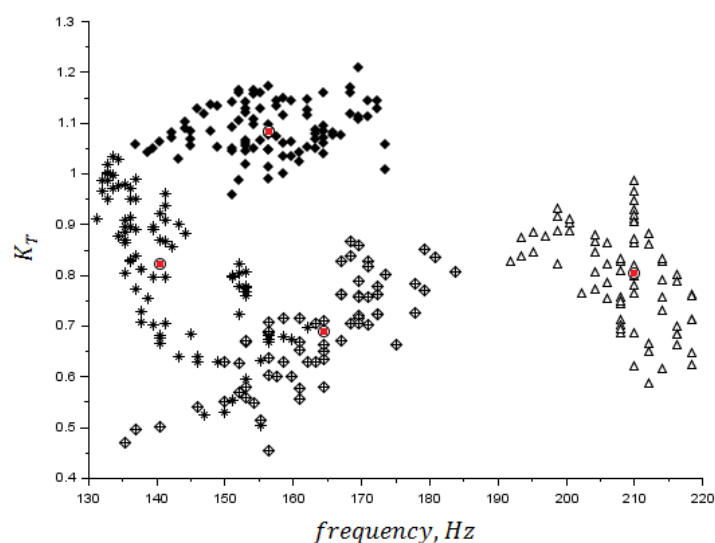


Рис. 2. Локалізовані структури голосового сигналу, які використовувались у дослідженні

Для кожної із сформованих таким чином локалізованих структур визначається середньозважений центр та деяка область простору навколо нього. Координати центру даної області визначаються як середнє арифметичне значень частоти фреймів та коефіцієнтів середньоквадратичного відхилення сигналів  $K_T$  відповідно:

$$K_{Tj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} K_{Tji}}{n_j},$$

$$F_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} F_{0ji}}{n_j},$$
(1)

де  $K_{Tj}, F_{0j}$  – відповідні координати центру  $j$ -ї області;  
 $K_{Tji}, F_{0ji}$  – відповідні координати  $i$ -ї точки  $j$ -ї області;  
 $n_j$  – кількість точок в  $j$ -й області;  
 $j = 1..m$  – кількість аналізованих звуків і відповідних областей простору характеристик.

Область простору, що виділяється навколо середньозваженого центру, має форму прямокутника. Це пов'язано з необхідністю швидкого та простого визначення меж координат точок простору характеристик, які потрапляють чи не потрапляють у дану область. Сторони кожного з цих прямокутників визначаються середньоквадратичним відхиленням точок простору, що відповідають фреймам досліджуваних сигналів:

$$\overline{S_{KT}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_j} (K_{Tji} - K_{Tj})^2}}{n_j},$$

$$\overline{S_{F0}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_j} (F_{0ji} - F_{0j})^2}}{n_j},$$
(2)

де  $\overline{S_{KT}}, \overline{S_{F0}}$  – відповідні середньоквадратичні відхилення коефіцієнту структури та частоти.

Сторона кожного з утворених прямокутників приймається вдвічі більшою, ніж отримане значення середньоквадратичного відхилення відповідної характеристики голосового сигналу, оскільки відхилення враховується як в більшу, так і в меншу сторону (рис. 3).

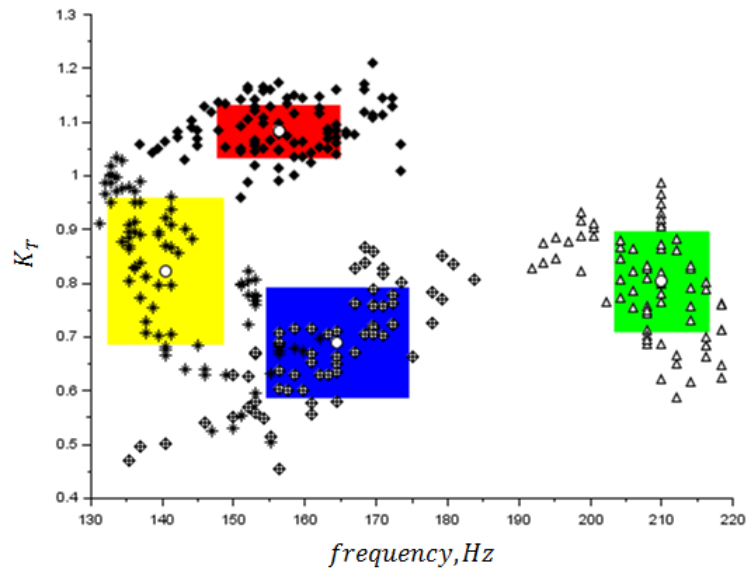


Рис. 3. Формування локалізованих структур у просторі характеристик «структура–частота»

Для кожного окремо взятого диктора система формує описані локалізовані структури на основі даних його власних акустичних записів, які несуть індивідуальну інформацію про цього диктора.

При виконанні процедури аутентифікації диктора виконується одиничний запис паролльної фрази. Отриманий акустичний матеріал обробляється аналогічними алгоритмами і для нього формується такі ж локалізовані структури із середньозваженими центрами. Критерій точності аутентифікації за такою процедурою пропонується визначати як середнє значення часток площі локалізованих структур усіх фонем, які потрапили у базові області відповідних фонем:

$$square_{f_{it}} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{\sum_{i=1}^m S_{0i}} * 100\%,$$
(3)

де  $S_i$  – площа локалізованої структури аналізованої фонемі, яка потрапила до базової області даної фонемі;  
 $S_{0i}$  – загальна площа області аналізованої фонемі;  
 $m$  – кількість аналізованих фонем.

Для визначення загальної площі виділеної області аналізованої фонемі  $S_{0i}$  достатньо перемножити

сторони відповідного прямокутника у просторі характеристик голосового сигналу. Для визначення площі перекриття  $S_i$  необхідно спочатку перевірити, які вершини виділеної області аналізованої фонему потрапляють у межі базової області даної фонему. Якщо усі 4 вершини знаходяться у межах базової області, то коефіцієнт відношення площ для даної фонему автоматично приймається рівним 1. Якщо ж деякі вершини виходять за межі даної області, програмний алгоритм визначає точки перетину меж базової та аналізованої областей. Ці точки обираються як вершини області перекриття і на їх основі визначаються довжини сторін області перекриття. За відомими сторонами визначається площа даної області.

Якщо отримані центри разом із виділеними областями фонему потрапляють у межі аналогічних базових областей для даного диктора, вважається, що диктор пройшов аутентифікацію. Якщо ж центр аналізованої виділеної області хоча б однієї фонему не потрапляє до базової області, або критерій точності аутентифікації має значення менше деякого визначеного рівня помилки (порогу аутентифікації), то вважається, що диктор не проходить процедуру аутентифікації. Рівень даного порогу визначається на основі експериментального дослідження розробленого алгоритму на акустичних матеріалах реальних людей.

У ході експериментального дослідження для 40 дикторів, частина з яких була занесена до бази, було сформовано голосові еталони на основі різної кількості акустичних записів паролльної фрази. Після цього через певні проміжки часу (6 годин, 1 добу, 3 доби та 7 діб) усім 40 дикторам було запропоновано пройти процедуру аутентифікації шляхом запису паролльної фрази і порівняння її зі сформованими голосовими еталонами. Запис проводився таким самим чином, що і записи при формуванні персоніфікованого голосового еталону, описаному вище. Відмінність полягала лише у тому, що диктор вимовляв паролльну фразу послідовно три рази.

Для оцінки якості та точності технологій ідентифікації та аутентифікації використовуються два показники, які визначалися для кожного часового інтервалу. Першим з них є FAR (False Acceptance Rate) – ймовірність помилки першого роду, тобто ймовірність того, що система визнає «чужого» за «свого». Другий показник – FRR (False Rejection Rate) – ймовірність помилки другого роду, тобто ймовірність того, що система не аутентифікує особу, яка є в її базі.

Будь-яку систему аутентифікації можна налаштувати на різний рівень жорсткості відбору, тобто на різний рівень помилки першого роду. Чим нижчий показник FAR, тим більш чутливою є система, тим вище ймовірність помилкового не розпізнання FRR (рис. 4).

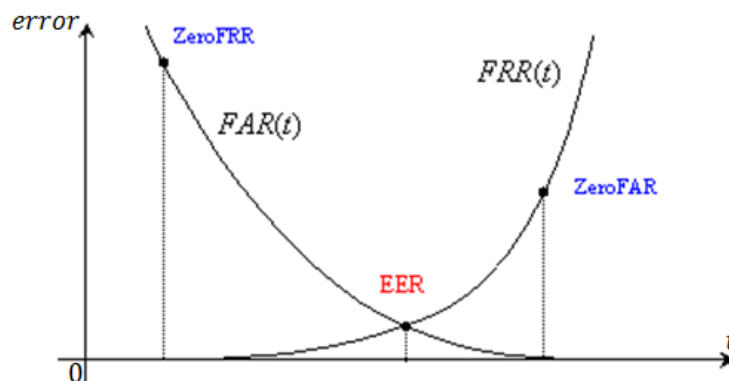


Рис. 4. Помилки першого ( $FAR$ ) та другого ( $FRR$ ) роду в залежності від порогу чутливості  $t$  [7]

При аналізі біометричних систем додатково також визначаються наступні показники:

- $EER$  (Equal Error Rate) – системна помилка, за якої помилки першого та другого роду співпадають ( $FAR = FRR$ );
- $ZeroFAR$  – значення помилки другого роду, за якого значення помилки першого роду дорівнює 0 ( $FAR = 0$ );
- $ZeroFRR$  – значення помилки першого роду, за якого значення помилки другого роду дорівнює 0 ( $FRR = 0$ ) [7].

Ідеальними є такі показники помилки і відмови аутентифікації, за яких при достатньо високій надійності аутентифікації досягається досить мала відмова аутентифікації. У загальному випадку, для кожної технології ці показники різняться. Залежно від конкретної задачі система налаштовується на певний компроміс між допустимими значеннями FAR і FRR.

Для розробленого способу аутентифікації особистості показник FAR визначався як відношення кількості аутентифікованих дикторів, які відсутні у базі, до загальної кількості дикторів, відсутніх у базі. Показник FRR визначався як відношення кількості не аутентифікованих дикторів, які наявні у базі, до загальної кількості дикторів, наявних у базі. Поріг чутливості задавався критичним рівнем критерію аутентифікації  $square_{crit}$ . Результати дослідження з урахуванням часових особливостей подано у таблиці 1 та на рис. 5.

## Помилки аутентифікації першого та другого роду розробленої системи

FAR											
Часовий інтервал	square_fit										
	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
6 годин	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,15	0,05	0,00	0,00
1 доба	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,40	0,20	0,10	0,00	0,00	0,00
3 доби	0,60	0,55	0,50	0,35	0,30	0,25	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00
7 діб	0,65	0,55	0,40	0,30	0,25	0,20	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00

FRR											
Часовий інтервал	square_fit										
	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
6 годин	0,00	0,02	0,05	0,08	0,15	0,18	0,22	0,37	0,58	0,85	0,93
1 доба	0,00	0,03	0,08	0,13	0,17	0,22	0,32	0,42	0,60	0,85	0,93
3 доби	0,00	0,07	0,08	0,15	0,17	0,23	0,32	0,43	0,62	0,88	0,95
7 діб	0,02	0,07	0,13	0,15	0,20	0,28	0,33	0,50	0,65	0,88	0,97

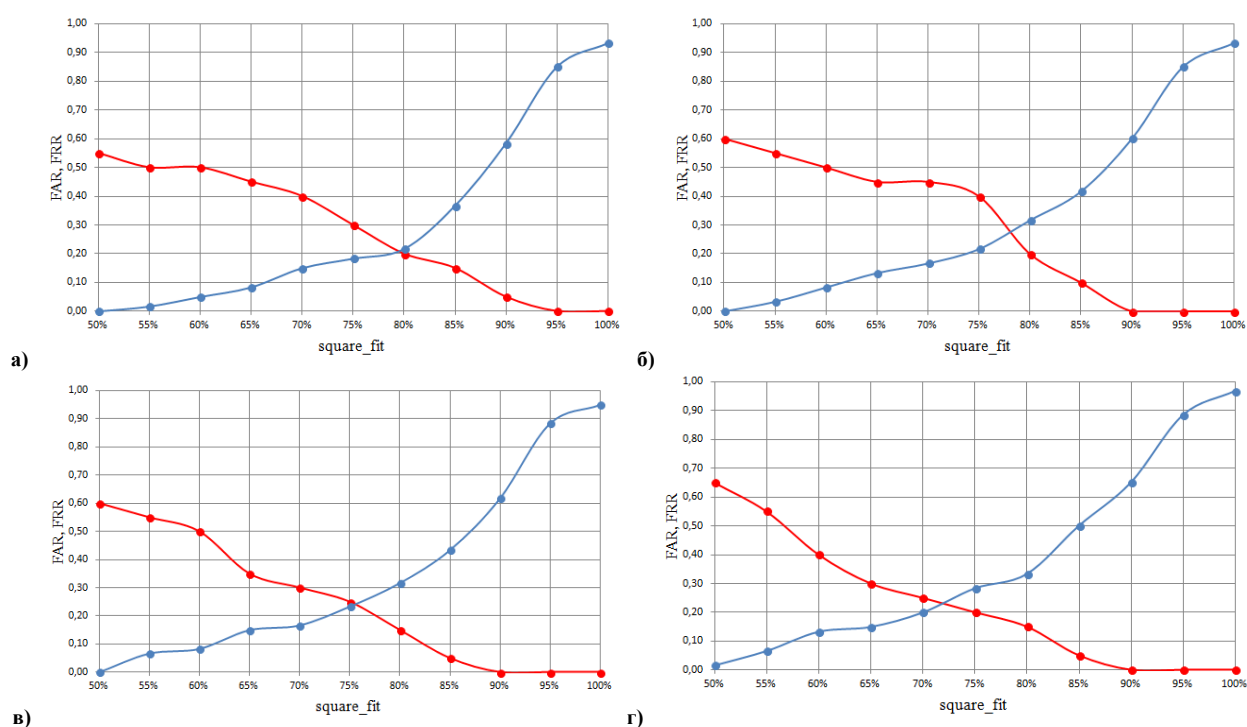


Рис. 5. Порівняння помилок аутентифікації при різних рівнях порогового значення критерію аутентифікації а – через 6 годин; б – через 1 добу; в – через 3 доби; г – через 7 діб після формування голосового еталону

Як бачимо, загальний вигляд кривих FAR та FRR є подібним до теоретичного, наведеного на рис. 4. Основна відмінність полягає у значному збільшенні помилки першого роду при високих порогових рівнях критерію аутентифікації. У той же час дана особливість вказує на те, що розроблена технологія є надто чутливою до таких рівнів критерію аутентифікації і їх використання на практиці не є бажаним.

З іншого боку, використання низьких рівнів критерію аутентифікації призводить до того, що система може аутентифікувати дикторів, які насправді відсутні у базі. З цієї причини використання критерію аутентифікації з пороговим рівнем нижче 50% також не є доцільним.

Якщо розглядати інші показники аутентифікації, то усі вони характеризуються незначною часовою динамікою. Показник **ESR** з плином часу збільшується від 20% до 27,3%. При цьому даний показник поступово зміщується в область менших порогових значень критерію аутентифікації з плином часу.

Показник **ZeroFAR** знаходиться у межах 90–95%, у той час, як **ZeroFRR** знаходиться на рівні 50%, що було вказано вище. Обидва ці показники мають тенденцію до зменшення з плином часу, однак їх динаміка також є незначною.

З огляду на отримані результати, можна стверджувати, що пороговий критерій аутентифікації **square\_fit** для розробленої системи може бути встановлений на рівні 80–85% з подальшим динамічним коригуванням. Точне його значення повинно визначатись для кожної конкретної практичної реалізації у залежності від кількості дикторів в організації, а також особливостей їх голосових матеріалів. До того ж у розробленій системі передбачено динамічне регулювання даного параметру, що дозволить гнучко регулювати процедуру аутентифікації.



З іншого боку, постає питання в актуальності голосових еталонів дикторів з плином часу. З урахуванням того, що уже за тиждень рівень критерію аутентифікації для кожного диктора знижується майже до 70%, але стабілізується на цьому рівні, то такі еталони ще можна вважати актуальними. Однак через 28 днів голосові еталони для більшості дикторів уже перестають бути актуальними. Значення критерію аутентифікації для них у більшості випадків знижується до 50%, а інколи і нижче. Даний рівень критерію аутентифікації є близьким до показника *ZeroFRR* і є неприйнятним для використання у системі аутентифікації. З урахуванням цього при практичному використанні розробленої системи аутентифікації рекомендується оновлення голосових еталонів кожні 28–30 днів.

**Висновки.** У ході дослідження було розроблено критерії персональної аутентифікації за голосовим сигналом. Даний критерій передбачає побудову локалізованих структур у просторі характеристик голосового сигналу. Попередня обробка та виділення цих характеристик виконується на основі алгоритмів, попередньо розроблених автором.

Визначено геометричні особливості побудови локалізованих структур у просторі характеристик для зменшення обчислювальної складності процедури аутентифікації. Критерій аутентифікації визначено як середнє значення часток площі локалізованих структур усіх фонем, які потрапили у базові області відповідних фонем.

Досліджено динаміку розробленого критерію аутентифікації на основі показників аутентифікації FAR та FRR. Визначено, що з плином часу значення розробленого критерію стабілізується на рівні 0,7, однак для задачі аутентифікації доцільно встановлювати його на рівні 0,8-0,85. Однак з огляду на значну динаміку голосового сигналу як бази аутентифікації доцільно оновлювати персоніфіковані голосові еталони з періодичністю 28–30 днів.

### Література

1. Мешков О.Ю. Метод локальних максимумів для виділення вокалізованих ділянок голосового сигналу людини / О.Ю. Мешков, О.О. Новіков, С.М. Злепко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 6. – С. 197–210.
2. Мешков О. Ю. Запис та обробка первинного акустичного матеріалу для задачі аналізу голосового сигналу людини та виділення його основних характеристик / О. Ю. Мешков // Наукові праці : наук. журн. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили ; ред. кол. : М. Т. Фісун (голова) та ін. – Миколаїв, 2017. – Т. 307. Вип. 295. – С. 76–81. – (Комп'ютерні технології).
3. Мешков О.Ю. Аналіз голосових сигналів людини та аутентифікація особистості за голосом : монографія / О. Ю. Мешков, О. О. Новіков, В. О. Новіков. – Херсон : ФОП Вишемирський В.С., 2018. – 168 с.
4. Ляшенко Г. Є. Дослідження ефективності методів біометричної аутентифікації / Г. Є. Ляшенко, А. А. Астраханцев // Системи обробки інформації. – 2017. – № 2(148). – С. 111–114.
5. Первушин Е.А. Обзор основных методов распознавания дикторов / Е.А. Первушин // Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып. 24. – С. 41–54.
6. Булгакова Е.В. Метод идентификации дикторов на основе сравнения статистик длительностей фонем / Е.В. Булгакова, А.В. Шолохов, Н.А. Томашенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Том 15. № 1. – С. 70–77.
7. Біометрика [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.biometrika.it/eng/wp\\_biointro.html](http://www.biometrika.it/eng/wp_biointro.html)

### References

1. O.Yu. Mieshkov, O.O. Novikov, S.M. Zlepko Metod lokalnykh maksimumiv dlia vydilennia vokalizovanykh dilianok holosovoho syhnalu liudyny // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – 2018. – №6. – S. 197-210.
2. Mieshkov O. Yu. Zaps ta obrobka pervynnoho akustychnoho materialu dlia zadachi analizu holosovoho syhnalu liudyny ta vydilennia yoho osnovnykh kharakterystyk // Naukovi pratsi : nauk. zhurn. / Chornom. nats. un-t im. Petra Mohyly ; red. kol. : M. T. Fisun (holova) [ta in.]. – Mykolaiv, 2017. – T. 307. Vyp. 295. – 132 s. – (Kompiuterni tekhnolohii). – S. 76-81.
3. Mieshkov O.Yu., Novikov O.O., Novikov V.O. Analiz holosovykh syhnaliv liudyny ta autentyfikatsiia osobystosti za holosom: Monohrafiia [Tekst] / O. Yu. Mieshkov, O. O. Novikov, V. O. Novikov. – Kherson: vyd-vo FOP Vyshemyrskiy V.S., 2018. – 168 s. (9,17 druk. ark.)
4. Doslidzhennia efektyvnosti metodiv biometrychnoi autentyfikatsii / H. Ye. Liashenko, A. A. Astrakhantsev // Systemy obrobky informatsii. — 2017. — № 2(148). — S. 111-114.
5. Pervushyn E.A. Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya dyktorov // Matematycheskye struktury y modelyrovanye, vyp. 24, s. 41-54, 2011.
6. Bulhakova E.V., Sholokhov A.V., Tomashenko N.A. Metod ydentyfikatsyy dyktorov na osnove sravneniya ctatystyk dlytelnoستي fonem // Nauchno-tekhnicheskyi vestnyk ynformatsyonnykh tekhnolohiyi, mekhanyky y optyky. 2015. Tom 15. № 1. S. 70–77.
7. Biometryka [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: [http://www.biometrika.it/eng/wp\\_biointro.html](http://www.biometrika.it/eng/wp_biointro.html)

Рецензія/Peer review : 19.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

Т.М. МАНСУРОВ, Ч.П. АЛИЕВ, Г.И. ГУЛИЕВА, Э.Т. МАНСУРОВ  
Азербайджанский технический университет, г. Баку

## ФОТОННЫЙ КОММУТАТОР КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ И ОПТИЧЕСКОГО ШУМА ПО КВАНТОВОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ

*В работе решены вопросы разработки фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, схема его управления и математическая модель функционирования, позволяющие повысить точность процесса пространственной коммутации выхода квантовой системы с входом оптического волокна, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием источника сигналов оптического излучения, а также расширить функциональные возможности. Данные разработки позволили упростить конструкцию, повысить точности процесса пространственной коммутации сигналов оптического излучения, эксплуатационную надежность, а также расширить функциональные возможности. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся принципами построения оптической связи, процессами, происходящими при передаче сигналов оптического излучения по оптическому волокну, изучениями основных закономерностей коммутации и ввода энергетического потенциала сигналов оптического излучения квантовой системы в оптическое волокно.*

**Ключевые слова:** коммутация каналов, фотонный коммутатор, оптическое излучение, квантовая система, радиальное смещение, угловое рассогласование, надежность.

T.M. MANSUROV, CH.P. ALIYEV, G.I. GULIYEVA, E.T. MANSUROV  
Azerbaijan Technical University, Baku

## THE PHOTON SWITCHBOARD OF QUANTUM SYSTEM OF INFORMATION TRANSFER AND OPTICAL NOISE ON THE QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL

*In work issues of development of the photon switchboard of quantum system of information transfer and optical noise on a quantum communication channel, the scheme of his management and mathematical model of functioning allowing to increase the accuracy of process of spatial switching of an exit of quantum system with an input of optical fiber, to reduce the losses connected with the radial shift and an angular mismatch of a source of signals of optical radiation and also to expand functionality are resolved. These developments have allowed to simplify a design, to raise the accuracy of process of spatial switching of signals of optical radiation, operational reliability and also to expand functionality. Reduction of total of mechanical elements and knots with an irregular geometrical shape and a configuration simplifies a design of the offered switching device. Increase in accuracy of process of switching of a signal of quantum system is provided by introduction of two piezoelectric bimorph elements having rather smaller mobile weight and, therefore, smaller lag effect and also due to lack of mechanical side plays of knots. Operational reliability increases because optical fibers of communication channels aren't exposed to deformation, i.e. are in a motionless state since scanning of a signal of quantum system is carried out by his reflection by an adaptive pocket mirror through a mirror - the reflector to openings of a level of the switching optical fibers. Work is of interest for a wide range of the experts who are engaged in the principles of creation of optical communication, processes happening when signalling optical radiation on optical fiber, studying of the main regularities of switching and input of energy potential of signals of optical radiation of quantum systems in optical fiber at creation of optical communication networks.*

**Keywords:** channel switching, photon switchboard, optical radiation, quantum system, radial shift, angular mismatch, reliability.

### Введение

В настоящее время на инфокоммуникационных сетях для приема информации, передаваемой квантовой системой по оптическим волокнам оптического кабеля, применяются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов [1]. Также при защите информации, транслируемой по оптическим каналам связи методами квантовой криптографии, в качестве приемника информации часто используют счетчики фотонов [2–11]. Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед разработчиками систем передачи информации по оптоволоконным и открытым каналам оптической связи, является повышение чувствительности приемного модуля. Решение этой задачи позволит уменьшить необходимое для качественной передачи информации число промежуточных регенерационных пунктов. Для приема сигналов квантовой системы малой мощности необходимо использовать высокочувствительные методы регистрации оптического излучения, одним из которых является счет фотонов [1]. Наряду с этим, решающую роль играет разработка устройства согласования выхода источника и входа приемника с волокнами оптического кабеля для передачи полного энергетического потенциала выходного сигнала квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи. В качестве устройств согласования применяются фотонные коммутаторы, устройства позиционирования и переключения, дефлекторы, модуляторы с электрическим и оптическим управлением, устройства ввода и вывода оптического сигнала, соединители, ослабители, изоляторы, поляризационные контроллеры, разветвители, мультиплексоры, демультимплексоры и фильтры. Эти устройства характеризуются параметрами согласования, т.е. коэффициентом ввода энергетического потенциала сигнала в волокно оптического кабеля, вносимым затуханием, рабочим диапазоном длин волн или частот, допустимым уровнем мощности. В связи с этим решение задачи по обеспечению точного согласования является одной из наиболее распространенных и важных задач исследования. Несогласованное включение приводит к дополнительным потерям и искажениям сигнала квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу

связи

Анализ существующих устройств согласования показывает, что они имеют сложную механическую конструкцию, относительно низкую надежность и не обеспечивают достаточно высокую точность процесса коммутации каналов передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи. Кроме того, процесс коммутации каналов требует автоматического управления направлением распространения сигналов квантовой системы относительно поверхности торцевого сечения оптического волокна в вертикальном и горизонтальном направлениях при возникновении различных аварийных и других необходимых случаях. В связи с этим, практический и теоретический интерес представляет собой задачи разработки и моделирования фотонного коммутатора квантовой системы, как пассивный компонент линейного тракта оптической связи.

**Объектом исследований** является фотонный коммутатор квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

**Предметом исследований** является исследование основных закономерностей процесса коммутации, выполняемого фотонного коммутатора квантовой системы, применяемых при передаче информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

**Целью работы** является разработка фотонного коммутатора квантовой системы, схемы управления и математической модели функционирования, позволяющие повысить точность процесса фотонной коммутации, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием источника сигнала, а также расширить функциональные возможности.

#### **Состояние проблемы и постановка задачи**

Известны устройства согласования передачи оптических сигналов [11–18], в которых в основном используются резьбовые соединения, в процессе эксплуатации которых происходит механический износ резьбовых поверхностей, приводящий к неизбежному появлению люфтов, которые способствуют смещению центров лучепередающих и лучепринимающих оптических волокон двух отрезков оптического кабеля. Из-за сравнительно меньшего поперечного сечения оптического волокна смещение центров создает потери энергетического потенциала полезного сигнала квантовой системы в процессе передачи и эти устройства не обеспечивают высокую точность коммутации каналов передачи сигналов квантовой системы. Поэтому актуальным является задача исследования основных закономерностей процесса пространственной коммутации каналов передачи информации по оптическому волокну. Процесс пространственной коммутации каналов осложняется еще и тем, что не имеются конкретные данные о координатах расположения в пространстве выхода и входа приемопередающего устройства и оптического волокна, т.е. существует угловое расхождение положения между ними. В процессе передачи информации задача поиска, наведения и слежения за оптическим излучением требует достаточно быстрого изменения направления распространения оптического излучения по некоторому периодическому (поиск) или аperiodическому (слежение) закону. Эта задача выполняется в основном коммутаторами, дефлекторами, разветвителями и модуляторами с электрическим и оптическим управлением и др. Время, точность и эффективность процесса коммутации квантовых каналов зависит от сложности конструкции самого фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, обеспечивающего автоматическое совмещение осей приемопередатчика.

В связи с этим возникает необходимость решения задач разработки и моделирования пассивных компонентов оборудования линейного тракта оптической связи, т.е. фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, схемы управления и аналитического метода расчета параметров, позволяющие повысить точность процесса фотонной коммутации, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием оптического волокна, упростить конструкцию, повысить эксплуатационную надежность, а также расширить функциональные возможности.

**Формирование функции цели.** Эффективность процесса передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи определяется многими факторами, к числу которых можно отнести повышение эффективности использования существующих линейных сооружений, уменьшение дисперсионных искажений, увеличение длины регенерационных участков, уменьшение числа промежуточных регенерационных пунктов, исследование основных закономерностей процесса фотонной коммутации, переключения и позиционирования направления оптического излучения квантовой системы передачи информации при вводе в оптическое волокно.

Повышение энергетической эффективности передачи сигналов квантовой системы заключается в решении двух основных задач, т.е. формировании целевой функции и определении таких значений ее показателей, которые обеспечили бы работу фотонного коммутатора в оптимальных значениях целевой функции. Руководствуясь вышеперечисленными принципами целевую функцию процесса коммутации фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу можно представить в следующем виде:

$$E_{эфд} = \{ \min [t_{ком}, \Delta_{ком}, n_{НПП}], \max [K_{эф}, L_{рв}] \}, \quad (1)$$

где  $t_{ком}$  – время (быстродействие) фотонного коммутатора каналов передачи сигнала квантовой системы;  $\Delta_{ком}$  – погрешность процесса коммутации, выполняемого фотонным коммутатором квантовой

системы;  $n_{\text{НРП}}$  – число промежуточных необслуживаемых регенерационных пунктов, размещаемых вдоль оптической кабельной магистрали;  $K_{\text{ос}}$  – коэффициент ввода фотонным коммутатором энергетического потенциала сигналов квантовой системы передачи информации и оптического шума в оптическое волокно;  $L_{\text{пу}}$  – длина регенерационного участка.

Для повышения эффективности передачи сигналов квантовой системы проведено исследование по разработке фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи и моделированию процесса его функционирования, обеспечивающего оптимального значения аргументов вышеприведенной целевой функции.

**Схема организации оптической связи.** Схема организации оптической связи с фотонным коммутатором квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи приведена на рис. 1.

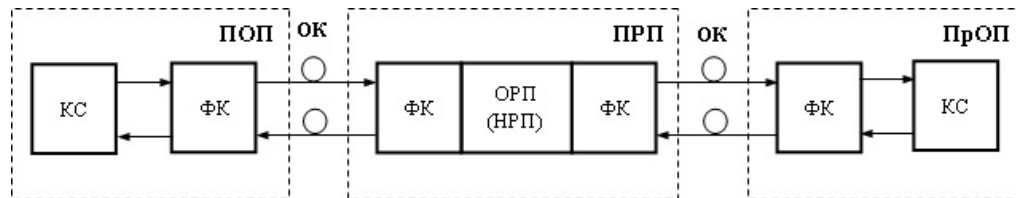


Рис. 1. Схема организации оптической связи передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

Схема организации оптической связи состоит из передающего (ПОП) и приемного (ПрОП) оконечного пункта, промежуточного регенерационного пункта (ПРП) и оптического кабеля (ОК). В свою очередь, каждый оконечный пункт состоит из квантовой системы (КС), фотонного коммутатора (ФК), а ПРП из двух ФК, обслуживаемого (ОРП) или необслуживаемого регенерационного пункта (НРП).

Структурная схема квантовой системы передачи и приема информации и оптического шума по квантовому каналу связи представлена на рис. 2 [1].

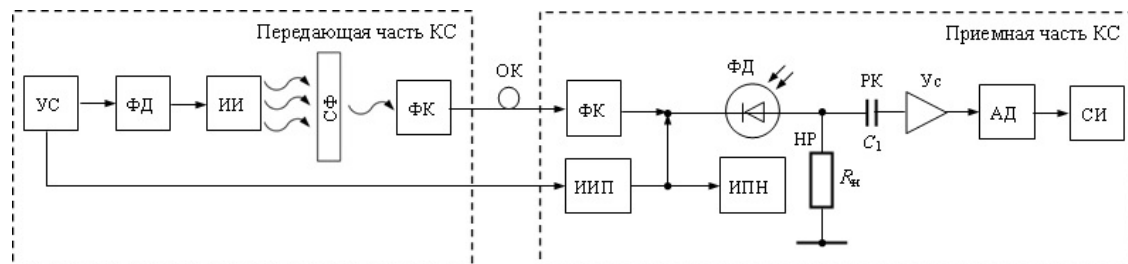


Рис. 2. Структурная схема квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

Передающая часть квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи содержит устройство синхронизации (УС), формирователь данных (ФД), источник излучения (ИИ), световой фильтр (СФ) и фотонный коммутатор (ФК), а приемная часть – источник импульсного питания (ИИП), источник постоянного напряжения (ИПН), фотонный коммутатор (ФК), лавинный фотодиод (ФД), усилитель (Ус), амплитудный детектор (АД), счетчик импульсов (СИ), разделительный конденсатор (РК)  $C_1$  и нагрузочный резистор (НР)  $R_n$ .

**Принцип работы квантовой системы передачи.** Синхронизация моментов времени передачи и приема информации и обеспечение согласованной работы ИИ и ФД осуществляется УС, которое подает сигнал на вход ФД и ИИП. В случае отсутствия на выходе УС импульса, данные в канал связи не поступают, ИИП не генерирует импульсы и напряжение на его выходе равно нулю. При этом ИПН обеспечивает приблизительно 99% уровня напряжения обратного смещения ФД по сравнению с напряжением его пробоя. Отметим, что значение напряжения питания ФД, меньшее напряжения пробоя не позволяет ФД работать в режиме счета фотонов. При поступлении сигнала синхронизации на вход ФД, последний на своем выходе генерирует электрический импульс в случае необходимости передать символ «1». При передаче символа «0» выходной импульс не формируется. Импульс с выхода ФД подается на вход ИИ, на выходе которого возникает оптический импульс, ослабляемый СФ в среднем до одного фотона, в результате чего с выхода СФ через линию связи на ФД подается один фотон. Одновременно по сигналу УС ИИП формирует прямоугольный импульс стробирования длительностью  $\Delta t$ , который также поступает на вход ФД, увеличивая напряжение его смещения до значений, превышающих напряжение пробоя, тем самым, переводя ФД в режим счета фотонов. Поступающий в канал связи отдельный фотон излучения регистрируется ФД и на нагрузочном резисторе  $R_n$  формируется так называемый однофотонный импульс напряжения, поступающий через РК -  $C_1$  на вход усилителя. После усиления импульс подается на вход АД, выделяющего однофотонный импульс на фоне собственных шумов усилителя и отделяющего импульсы помех, возникающие за счет прохождения импульса стробирования через собственную емкость ФД и РК -

$C_1$  на вход усилителя. Отметим, что импульсы помех имеют амплитуду, более чем в пять раз, превышающую среднюю амплитуду одноквантового импульса. С выхода АД однофотонный импульс поступает на вход СИ, где он регистрируется. Наряди с этими, одним из основных устройств квантовой системы является фотонный коммутатор, разработка которого представляет определенный практический и теоретический интерес.

**Разработка фотонного коммутатора квантовой системы.** Фотонный коммутатор должен обеспечивать передачу максимально возможного энергетического потенциала выходного сигнала квантовой системы передачи информации в оптическое волокно и из оптического волокна в приемник оптического сигнала. Сложность конструкции фотонного коммутатора передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи определяется характеристиками квантовой системы.

Как показали результаты анализа [12–16, 18], известен «Электромеханический переключатель оптических волокон» [21], в котором  $V$  –образная юстировочная канавка выполнена на цилиндрической поверхности диска, которая жестко закреплена на валу шагового двигателя, причем юстировочная канавка расположена параллельно оси вращения диска и в ней жестко установлен наконечник коммутирующего ОВ, а наконечники коммутируемых ОВ расположены по окружности встречно наконечнику коммутирующего ОВ и каждый из них находится в радиальном пазу неподвижного кольца, охватывающего диск и подпружинен в осевом и радиальном направлениях, при этом в радиальном направлении они контактируют с поверхностью расположения юстировочной канавки, а стыкуемые торцы наконечников имеют направляющую фаску. Данный переключатель включает в себя сравнительно большое количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, усложняющих конструкцию данного переключателя, а также не обеспечивает высокую точность переключения направления распространения сигналов оптического излучения, т.к. из-за сравнительно большой массы вращающего диска обладает определенной инерционностью. После остановки двигателя ввиду имеющихся люфтов точность процесса переключения уменьшается, что приводит к частичной потере энергии излучения передаваемого сигнала. Эксплуатационная надежность данной конструкции переключателя невысокая, т.к. оптические волокна, служащие каналами связи, находятся в подвижных состояниях.

Для достижения поставленной цели разработана схема фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи с использованием пьезоэлектрических биморфных элементов (ПБЭ) (рис. 3) и схема его управления (рис. 4) [15].

Пьезоэлектрический биморфный элемент, работающий на изгиб, являются перспективными в применении, т.к. они имеют максимально простую конструкцию и схему управления и составлен из двух пластин. При подаче напряжения на электроды одна из пластин, ввиду совпадения полярностей источника и полюсных электродов, происходит продольная деформация растяжения, в то время как другая ввиду обратной полярностей источника и полюсных электродов происходит деформация сжатия и в результате ПБЭ получает деформацию изгиба (на рис. 3 деформация изгиба ПБЭ показана пунктирными линиями). Кроме того, в качестве одной из пластин можно использовать не пьезоэлемент, а металлическая накладка такой толщины, чтобы пьезопластина лежала выше нейтрального слоя. Данное свойство ПБЭ было использовано при разработке фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, в состав которого входят коммутируемые (1) и коммутирующие (2) оптические волокна с наконечниками на концах (наконечники на рис. 3 не показаны).

Указанные коммутирующие оптические волокна жестко установлены не менее чем в два ряда (3) на широкой грани планки (П) (4), а фотоэлектрические датчики установлены в сквозных отверстиях (5), выполненных на торцевых боковых гранях с нижней и верхней стороны указанной планки, совпадающих с отверстиями соответственно нижнего и верхнего ряда коммутирующих оптических волокон. Средство сканирования оптического сигнала (6) и его смещенное (7) положение при сканировании (траектория смещения сигнала квантовой системы квантовой системы на рис. 2 показана условно пунктирными линиями) коммутируемых оптических волокон соединены к светодиоду (СД) (8) (рис. 3, 4) с возможностью сканирования указанного сигнала оптического излучения через фокусирующую линзу (9) и адаптивное зеркальце (АЗ) (10), жестко закрепленном на рабочем конце первого ПБЭ (11) фотонного коммутатора с возможностью сканирования сигнала квантовой системы передачи при его отклонении (12) (траектория движения на рис. 3 показано условно пунктирными линиями). Первый ПБЭ (11) сканирования сигнала

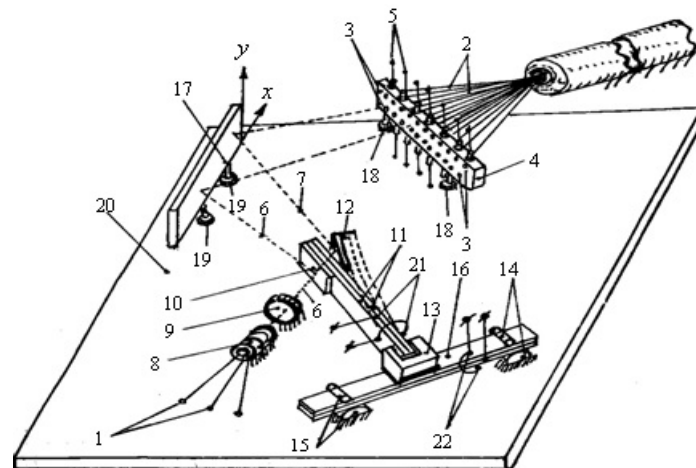


Рис. 3. Схема фотонного коммутатора передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

квантовой системы по горизонтальной оси «Х» через крепежный переходник (13) шарнирно (14, 15) установлен на втором ПБЭ (16) сканирования сигналов квантовой системы по вертикальной оси «У» и имеет возможности отражения сигнала квантовой системы через зеркало – отражатель (30) (17) к отверстиям указанной планки. Планка с помощью стоек (18) и зеркало-отражатель (17) с помощью стоек (19) закреплены на основании (20) фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи (рис. 3, 4). Электроды (21 и 22) ПБЭ фотонного коммутатора оси «Х» и «У» подключены соответственно к первому (23) и второму (24) блоку питания (БП) (рис. 4), к первому входу каждого из которых подключен регулятор напряжения (РН) (25, 26), а ко второму входу – задатчика (27, 28) номера канала связи (ЗНКС), к входу каждого из которых соединены соответственно фотоэлектрические датчики (ФЭД) (3) положения оптического сигнала первого и второго ряда каналов связи.

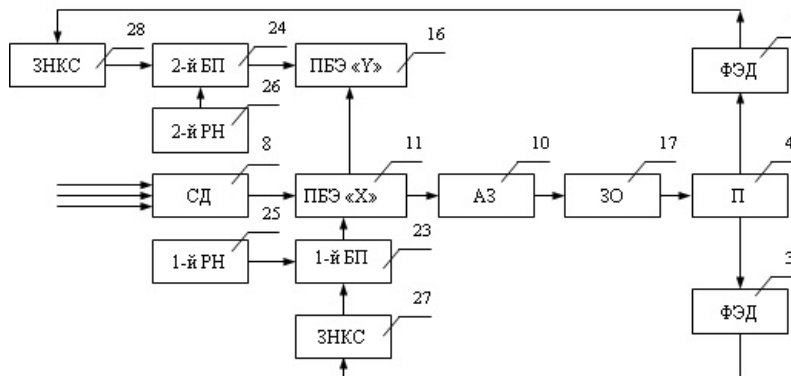


Рис. 4. Схема управления фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

**Принцип работы фотонного коммутатора квантовой системы.** Электрический сигнал (1), подаваемый к светодиоду (8), преобразуется в оптический сигнал (6), который через оптическую линзу (9) направляется на адаптивное зеркальце (10). Отражаясь от адаптивного зеркальца (10), сигнал КС (6) попадает на зеркало-отражатель (17), а также за счет отражения от последнего попадает на одно из отверстий (3), например, верхнего ряда планки (4) коммутирующего оптического волокна. В соответствии с заданным номером коммутирующего оптического волокна в задатчике (27 и 28) номера канала связи устанавливается необходимый номер канала связи, т.е. уровень напряжения питания от источника (23, 24).

При включении источника питания, напряжение с выхода подается на электроды (21, 22) пьезоэлектрического биморфного элемента (11, 16), которое соответственно создает изгибную деформацию первого ПБЭ (11), которое приводит к смещению лучевого сигнала (6) относительно оси «Х», переводя его в положение (7) (на рис. 3 показано условно пунктирными линиями), при этом указанный сигнал с выхода фотонного коммутатора направляется на заданное коммутирующее ОВ, а также создает изгибную деформацию ПБЭ (16) относительно оси «У» переводя его в положение заданного ряда коммутирующих оптических волокон. Остановка и фиксация заданного положения фотонного коммутатора обеспечивается фотоэлектрическими датчиками (5), которые при появлении сигнала на выходе фотонного коммутатора квантовой системы в соответствии с заданным номером коммутирующего оптического волокна канала связи формирует сигнал воздействия на вход задатчика (27, 28) номера канала связи, приводящий к автоматическому установлению уровня напряжения питания в регуляторе (25, 26) относительно оси «Х» и оси «У», подводимого к ПБЭ соответственно.

Фотонный коммутатор квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи может работать и в режиме кратковременных передач выходного сигнала квантовой системы по различным каналам связи в соответствии с заданным алгоритмом с их кратковременным переключением через компьютер, который может быть введен в состав задатчика номера коммутирующего оптического волокна квантового канала связи.

#### Аналитический метод расчета параметров фотонного коммутатора квантовой системы

В связи с требованием достаточно высокой точности процесса фотонной коммутации и необходимостью автоматического управления направлением выходного сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи необходимо разработать аналитический метод определения параметров данного фотонного коммутатора квантовой системы, который позволил бы более точно оценить его технологические, механические и эксплуатационные характеристики. Рассмотрим некоторые из них.

При подаче напряжения с источника питания происходит изгибное колебание стержня пьезоэлектрического биморфного элемента с прямоугольным сечением, которое описывается нижеприведенным дифференциальным уравнением по формуле:

$$E \cdot I \frac{d^4 \eta}{dx^4} - \rho \cdot S \frac{d^2 \eta}{dt^2} = 0. \quad (2)$$

Согласно принципу действия фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи угол сканирования сигнала, т.е. угол между предельными его положениями определяется по следующей формуле:

$$\phi_{ск} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2}, \quad (3)$$

где  $U_m$  – максимальная величина управляющего напряжения, при котором ПБЭ фотонного коммутатора сохраняет работоспособность в течение заданного срока службы (В);  $d_{31}$  – пьезомодуль изгибной деформации пьезокерамики;  $l_1, l_2, l_3$  – соответственно длина, ширина и толщина ПБЭ.

Разрешение сканирования  $N$  определяется как отношение угла сканирования к углу собственной расходимости выходного сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи  $\theta$  :

$$N = \frac{\phi}{\theta} = \frac{6d_{31} \cdot A_i \cdot U_m}{k \lambda l_3^2}, \quad (4)$$

где  $A_i$  – размер зеркала в плоскости сканирования, м;  $\lambda$  – длина волны выходного сигнала квантовой системы, (м);  $k$  – коэффициент, определяемый конструкцией фотонного коммутатора и распределением световой энергии по апертуре зеркала (обычно  $k = 1 \div 3$ ).

Однако исследования характеристик фотонного коммутатора квантовой системы передачи показывают, что уровень возбуждения ПБЭ фотонного коммутатора, устанавливаемого в нем согласно [21-24] выражается в единицах мощности, тока или напряжения. В случае верхнего предела, ограничивающего уровень возбуждения, наступает разрушение элемента. Ток не должен превышать 20мА/см<sup>2</sup> при колебаниях по толщине и 10мА/см<sup>2</sup> при продольных колебаниях.

Для обеспечения требуемой эксплуатационной надежности фотонного коммутатора квантовой системы передачи воспользуемся теорией изгиба упругой деформации прямоугольной пластинчатой пружины, закрепленной одним концом, при этом могут быть определены наибольшее напряжение в опасном сечении, момент инерции и величина амплитуды деформации изгиба по следующим формулам [16].

Длина ПБЭ фотонного коммутатора связана с пределом прочности и при его изгибе определяется следующим выражением:

$$l_1 = \frac{2\sigma_{изг.дон} l_2 l_3^2}{3F_{ПБЭ}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{изг.дон}$  – предел прочности при изгибе ПБЭ фотонного коммутатора (Н/м<sup>2</sup>);  $F_{ПБЭ}$  – сила, действующая на ПБЭ фотонного коммутатора (Н).

Амплитуда деформации свободного конца ПБЭ с зеркальцем определяется следующим образом:

$$\Delta_{изг.ПБЭ} = \frac{F_{ПБЭ} l_1^3}{3E_{Ю} J} = \frac{F_{ПБЭ}}{K_{ж\Sigma}}, \quad (6)$$

Момент инерции ПБЭ фотонного коммутатора определяется по следующей формуле:

$$J = \frac{l_2 \cdot l_3^3}{12}, \quad (7)$$

где  $E_{Ю}$  – модуль Юнга (модуль упругости) пьезокерамики, т.е. физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации;  $F_{ПБЭ}$  – сила, действующая на ПБЭ фотонного коммутатора (пластинчатую пружину) (Н);  $J$  – момент инерции (м<sup>4</sup>).

Суммарная жесткость пластин ПБЭ фотонного коммутатора, составляющих стержень с прямоугольным сечением определяется следующим образом:

$$K_{ж\Sigma} = \frac{E_{Ю} \cdot l_2 \cdot l_3^3}{4 \cdot l_1^3}, \text{ Н/м.} \quad (8)$$

Разрушающую механическую нагрузку (наименьшее значение механической нагрузки, приложенной к пластинам ПБЭ в заданных условиях, вызывающее ее разрушение), возникающую на пластинах, составляющих ПБЭ фотонного коммутатора, можно определить по формуле:

$$\sigma_{изг.дон} = E_- d_{31} E_{Ю} Q_m, \quad (9)$$

где  $E_-$  – электрическая прочность (В/м), характеристика диэлектрика, минимальная напряженность электрического поля, при которой наступает электрический пробой;  $Q_m$  – механическая



добротность (ед.), т.е. критерия превышения резонанса в механической системе, способной к колебаниям, образованной пьезоэлектрической пластиной и характеризует потери энергии в свободно колеблющейся пластине.

Учитывая, что нагрузка ПБЭ фотонного коммутатора носит переменный характер с большим циклом переключений и допустимое значение напряжения должно быть ниже предела выносливости материала, необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_{изг.дон} \leq 0,75 \cdot \sigma_{пр.изг} .$$

где  $Q_m$  – механическая добротность определяется экспериментально из амплитудно-частотной характеристики ПБЭ  $\Delta_{изг.ПБЭ} = \phi(f)$  (рис. 5).

Амплитудно-частотная характеристика фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи была построена с применением стробоскопа, микроскопа и источника переменного напряжения. Все точки характеристики соответствуют амплитуде колебаний в начале и конце измерений. При кратности частоты питания (т.е. амплитуды колебаний конца ПБЭ фотонного коммутатора) частоте импульсных световых вспышек стробоскопа появлялась кажущаяся неподвижность, а при их малой разности очень медленное перемещение конца пластины с зеркальцем, которое фиксировалось.

Механическая добротность ПБЭ фотонного коммутатора определяется из амплитудно-частотной характеристики по следующей формуле:

$$Q_m = f_p / \Delta f ,$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания;  $f_p$  – частота механического резонанса (Гц).

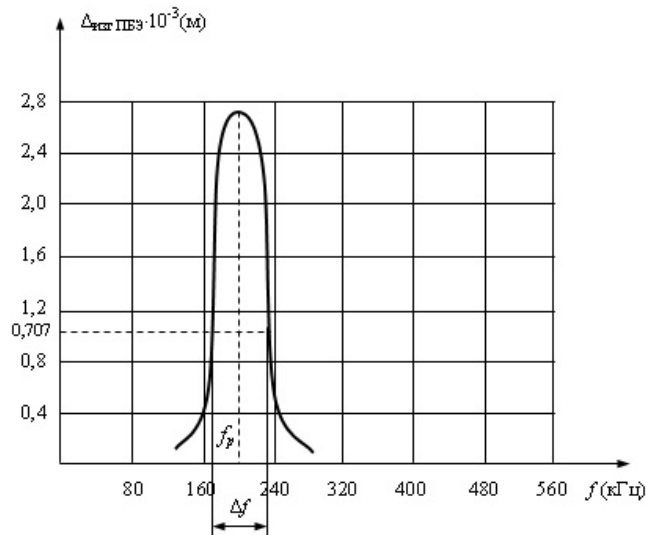


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ПБЭ фотонного коммутатора квантовой системы

Быстродействие фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи зависит от частоты механического резонанса ПБЭ фотонного коммутатора, параметров электрической схемы источника питания и определяется по следующей формуле:

$$\tau_{l_1} = 1 / 2 \cdot f_p .$$

Подставляя значения выражения (9) в выражение (5) получим:

$$l_1 = 2E_- d_{31} E_{ю} Q_m l_2 l_3^2 / 3F_{БЭ} . \quad (10)$$

Полученное значение (10) подставим в выражение (3) и получим следующую формулу угла сканирования сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи:

$$\phi_{ск} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2} = \frac{12E_- d_{31} E_{ю} Q_m l_2 l_3^2 d_{31} U_m}{3F_{БЭ}} / l_3^2 = \frac{4E_- d_{31}^2 E_{ю} Q_m l_2 U_m}{F_{БЭ}} . \quad (11)$$

При перемещении конца ПБЭ фотонного коммутатора вместе с зеркальцем, закрепленном на нем, возникает инерционная сила, которая уравнивается силой упругости ПБЭ фотонного коммутатора, т.е.

$$F_{зерк} = m \cdot W_{зерк} , \quad (12)$$

где  $F_{зерк}$  – сила инерции, создаваемая массой зеркальца (Н);  $m$  – масса зеркальца (кг·с<sup>2</sup>/м);  $W_{зерк}$  – ускорение конца ПБЭ фотонного коммутатора с зеркальцем (м/с<sup>2</sup>).

Для обеспечения нормальной работы фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи необходимо выполнение следующего

условия:

$$F_{\text{ПБЭ}} \geq F_{\text{зерк}}.$$

Таким образом, получим следующую зависимость:

$$\Delta_{\text{изг.ПБЭ}} = m \cdot W_{\text{зерк}} / K_{\text{жс}}. \quad (13)$$

Учитывая выражения (8) в выражении (13) получим:

$$\Delta_{\text{изг.ПБЭ}} = \frac{4 \cdot l_1^3 \cdot m W_{\text{зерк}}}{E_{\text{ю}} l_2 l_3^2}. \quad (14)$$

Из выражения (14) определим ширину ПБЭ фотонного коммутатора:

$$l_2 = \Delta E_{\text{ю}} l_3^3 / 4m W_{\text{зерк}} l_1^3. \quad (15)$$

Подставляя (15) в выражение (11) и произведя определенные преобразования, получим выражение, являющееся аналитической записи принципа действия квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи:

$$\phi_{\text{СК}} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2} = \frac{4E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}} Q_M l_2 l_3^2 U_m}{F_{\text{ПБЭ}} l_3^2} = \frac{4E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}} Q_M l_2 l_3^5}{m W_{\text{зерк}} l_1^3} / F_{\text{ПБЭ}} l_3^2 = \frac{E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}}^2 Q_M U_m \Delta_{\text{изг.ПБЭ}} l_3^2}{m W_{\text{зерк}}^3 F_{\text{ПБЭ}}}.$$

На основании проведенных экспериментальных исследований и полученных аналитических зависимостей были определены максимальная амплитуда деформации свободного конца ПБЭ фотонного коммутатора с зеркальцем, которая составила  $\Delta = 2,8 \cdot 10^{-3}$  м, механическая добротность  $Q_M = 6 - 7$  ед. и быстродействие ПБЭ:

$$\tau = 1 / 2f_{\text{рез}} = 1 / 2 \cdot 210 = 23 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Как следует из выше полученных аналитических зависимостей, по которым были определены основные параметры фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, а также погрешности экспериментально измеренных результатов, можно считать удовлетворительным и расхождение, между которыми составляет 1÷3%.

### Выводы

Таким образом, значительное сокращение общего количества механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией упрощает конструкцию предложенного фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

Повышение точности работы фотонного коммутатора обеспечивается путем введения двух пьезоэлектрических биморфных элементов, обладающих сравнительно меньшей подвижной массой и, следовательно, меньшей инерционностью, а также за счет отсутствия механических люфтов узлов данного фотонного коммутатора.

Эксплуатационная надежность фотонного коммутатора повышается за счет того, что оптические волокна каналов связи не подвергаются деформации, т.е. находятся в неподвижном состоянии, т.к. сканирование сигналов квантовой системы осуществляется путем его отражения адаптивным зеркальцем через зеркало - отражатель к отверстиям планки коммутирующих оптических волокон.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/07/1.

### Литература

1. Гулаков И.Р. Фотоприемники квантовых систем / Гулаков И.Р., Зеневич А.О. – Минск : ВГКС, 2012. – 260 с.
2. Килин С.Я. Квантовая информатика / С.Я. Килин // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. № 5. – С. 507–527.
3. Квантовая криптография: идеи и практика / [Килин С.Я., Хорошко Д.Б., Низовцев А.П. и др.]. – Минск : Беларус. Наука, 2007. – 391 с.
4. Курочкин В.Л. Экспериментальная установка для квантовой криптографии с одиночными поляризованными фотонами / В.Л. Курочкин, И.И. Рябцев, И.Г. Неизвестный // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75 (вып. 6). – С. 54–58.
5. Курочкин В.Л. Применение детекторов одиночных фотонов для генерации квантового ключа в экспериментальной оптоволоконной системе связи / В.Л. Курочкин, А.В. Зверев, Ю.В. Курочкин // Автотметрия. – 2009. – Т. 45. № 4. – С. 110–119.
6. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 1 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 2. – С. 36–39.
7. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 2 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 3. – С. 56–60.
8. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 3 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
9. Румянцев К.Е. Квантовая связь и криптография / Румянцев К.Е., Голубчиков Д.М. – Таганрог : Технологический институт Южного федерального университета, 2009. – 123 с.

10. Сыч Д.В. Анализ предельных возможных информационных характеристик протоколов квантовой криптографии / Д.В. Сыч, Б.А. Гришин, В.Н. Задков // Квантовая электроника. – 2005. – № 35. – С. 80, 81.
11. Хорошко Д.Б. Квантовая криптография: индивидуальный перехват с учетом протокола коррекции ошибок / Д.Б. Хорошко // Квантовая электроника. – 2007. – № 35. – С. 1105–1108.
12. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы : сборник статей / под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М. : Connect, 2000. – 376 с.
13. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи / Портнов Э.Л. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 486 с.
14. Розеншер Э. Оптоэлектроника / Розеншер Э., Винтер Б. – М. : Техносфера, 2006. – 595 с.
15. Шарупич Л.С. Оптоэлектроника / Шарупич Л.С. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
16. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи / Гроднев И.И. – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
17. Гроднев И.И. Волоконно-оптические системы передачи и кабели : справочник / Гроднев И.И. и др. – М. : Радио и связь, 1993. – 294 с.
18. Иванов А.Г. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи, измерения / Иванов А.Г. – М. : Компания Сайрус системс, 1999. – 327 с.
19. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2006. – 496 с.
20. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Гауэр Дж. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.
21. А.с. СССР 1322850 А1. Электромеханический переключатель оптических волокон. МКИ G02В - 6/38 от 22.04.85.
22. Балкаров О.М. Световые отклоняющие устройства на пьезокерамике / О.М. Балкаров, Ю.В. Манюшкин / Изв. ВУЗ-ов СССР. – М. : Машиностроение, 1972. – XVI № 9. – С. 112–115.
23. Смагин А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / Смагин А.Г., Ярославский М.И. – М. : Энергия, 1970.
24. Смажевская В.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Смажевская В.Г., Фельдман Н.В. – М. : Сов. радио, 1971. – 200 с.

#### References

1. Gulakov I.R. Fotopriemniki kvantovyih sistem / Gulakov I.R., Zenevich A.O. – Minsk : VGKS, 2012. – 260 s.
2. Kilin S.YA. Kvantovaya informatika / S.YA. Kilin // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1999. – T. 169. № 5. – S. 507–527.
3. Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika / [Kilin S.YA., Horoshko D.B., Nizovtsev A.P. i dr.]. – Minsk : Belarus. Nauka, 2007. – 391 s.
4. Kurochkin V.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya kvantovoy kriptografii s odinichnyimi polarizovannymi fotonami / V.L. Kurochkin, I.I. Ryabtsev, I.G. Neizvestnyy // Jurnal tehnicheckoy fiziki. – 2005. – T. 75 (vyip. 6). – С. 54–58.
5. Kurochkin V.L. Primenenie detektorov odinichnykh fotonov dlya generatsii kvantovogo klyucha v eksperimentalnoy optovolokonnoy sisteme svyazi / V.L. Kurochkin, A.V. Zverev, YU.V. Kurochkin // Avtometriya. – 2009. – T. 45. № 4. – С. 110–119.
6. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 1 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 2. – С. 36–39.
7. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 2 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 3. – С. 56–60.
8. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 3 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
9. Rumyantsev K.E. Kvantovaya svyaz i kriptografiya / Rumyantsev K.E., Golubchikov D.M. – Taganrog : Tehnologii-cheskiy institut YUjnogo federalnogo universiteta, 2009. – 123 s.
10. Syich D.V. Analiz predelnykh vozmozhnykh informatsionnykh harakteristik protokolov kvantovoy kriptografii / D.V. Syich, B.A. Grishin, V.N. Zadkov // Kvantovaya elektronika. – 2005. – № 35. – С. 80, 81.
11. Horoshko D.B. Kvantovaya kriptografiya: individualnyy perehvat s uchetoм protokola korraktsii oshibok / D.B. Horoshko // Kvantovaya elektronika. – 2007. – № 35. – С. 1105–1108.
12. Volokonno-opticheskaya tehnika: istoriya, dostijeniya, perspektivy : sbornik statey / pod red. Dmitrieva S.A., Slepova N.N. – М. : Connect, 2000. – 376 s.
13. Portnov E.L. Opticheskie kabeli svyazi i passivnyie komponentyi volokonno-opticheskikh liniy svyazi / Portnov E.L. – М. : Goryachaya liniya-Telekom, 2007. – 486 s.
14. Rozensher E. Optoelektronika / Rozensher E., Vinter B. – М. : Tehnosfera, 2006. – 595 s.
15. SHarupich L.S. Optoelektronika / SHarupich L.S. – М. : Energoatomizdat, 1984. – 256 s.
16. Grodnev I.I. Volokonno-opticheskie linii svyazi / Grodnev I.I. – М. : Radio i svyaz, 1990. – 224 s.
17. Grodnev I.I. Volokonno-opticheskie sistemyi peredachi i kabeli : cpravochnik / Grodnev I.I. i dr. – М. : Radio i svyaz, 1993. – 294 s.
18. Ivanov A.G. Volokonnaya optika: Komponentyi, sistemyi peredachi, izmereniya / Ivanov A.G. – М. : Kompaniya Sayrus sistems, 1999. – 327 s.
19. Friman R. Volokonno-opticheskie sistemyi svyazi / R. Friman. – М. : Tehnosfera, 2006. – 496 s.
20. Gauer Dj. Opticheskie sistemyi svyazi / Gauer Dj. – М. : Radio i svyaz, 1989. – 504 s.
21. А.с. SSSR 1322850 А1. Elektromehaniicheskiy pereklyuchatel opticheskikh volokon. МКИ G02V -6/38 от 22.04.85.
22. Balkarov O.M. Svetovyye otklonyayushchie ustroystva na pezokeramike / O.M. Balkarov, YU.V. Manoskin / Izv. VUZ-ov SSSR. – М. : Mashinostroenie, 1972. – XVI № 9. – С. 112–115.
23. Smagin A.G. Pezoelektrichestvo kvartsa i kvartsevyie rezonatoryi / Smagin A.G., YAroslavskiy M.I. – М. : Energiya, 1970.
24. Smajevskaya V.G. Pezoelektricheskaya keramika / Smajevskaya V.G., Feldman N.V. – М. : Sov. radio, 1971. – 200 s.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Мусаев В.Г.

## ON OPTIMUM OF EM ENERGY TRANSPORT ALONG 1D NANOSCALE SIMPLE METAL WAVEGUIDES WITH $\perp$ - AND $\perp$ -JUNCTIONS

Within the framework of the RPA method it was modelled the passage of an electromagnetic signal along a one-dimensional nanoscale structure immersed in a dielectric medium – a linear array of silver nanoparticles of spherical shape. The mentioned nanoscale 1D-array was considered as a waveguide. The signal that travels along the nanosized chain was considered as the plasmonic wave and it was described with allowance for the Lorentz friction. The remarkable feature of this study was the fact that one needed to calculate the efficiency of signal propagation along a linear array of nanospheres of radius  $a_0$ , which is the key parameter for nanospheres with the minimum attenuation of dipole oscillations when they occur. For silver nanospheres the value of the “special” radius  $a_0$  is about 9 nm. The center-to-center distance  $d$  between the particles was accepted as  $d=3a_0$ . The author considered a “long” nanochain: it supposed that its length is more than 500 nm. Due to considering metal nanospheres with special radius of  $a_0$  such arrays can demonstrate minimum damping when plasmonic waves travel along the structures: through not only straight structures as well as bent ones (with  $\perp$ -corners) and branched ones (with  $\perp$ -junctions). In this work it was calculated two characteristics of signal transmission through bent and/or branched nanoscale waveguides – the Power Transmission Coefficients ( $PTC_{L,T}$ ) and the Linear Attenuation Rates ( $LAR_{L,T}$ ) per 500 nm of waveguide length. The calculated value of the averaged LAR was about 1 dB per 500 nm for vacuum medium and about 0.6 dB per 500 nm for Silica glass medium. Calculations based on the proposed model are in good agreement with independent experimental data and obtained results are very close to the calculated data obtained by other researchers who used the TDLDA method. This speaks certainly in favor of a more accurate method of random phase approximation.

**Keywords:** surface plasma oscillations; plasmonics; metallic nano-chain; nanoscale waveguides; energy transport.

A.O. ЧЕПОК

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОХОЖДЕНИИ ЭМ СИГНАЛА ВДОЛЬ ОДНОМЕРНОГО ВОЛНОВОДА ИЗ НАНОЧАСТИЦ ПРОСТЫХ МЕТАЛЛОВ, ВЫПОЛНЕННОГО С ИЗГИБАМИ И РАЗВЕТВЛЕНИЯМИ

В рамках RPA-модели исследовано прохождение ЭМ сигнала вдоль одномерной наномасштабной структуры (длинная цепочка из наночастиц серебра), помещенной в диэлектрик. Указанная структура рассматривалась как волновод для незатухающих плазмонных волн. В модели учитывалось трение Лоренца. Особенностью данного моделирования были расчеты для наночастиц радиуса  $a_0$ , который соответствует минимальному затуханию возникающих в наночастицах дипольных колебаний. Для серебряных наночастиц это около 9 нм. Вторым важным параметром цепочки было межцентровое расстояние. Расчеты, проведенные на основе предложенной модели, хорошо согласуются с независимыми экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** поверхностные плазменные колебания, наномасштабные волноводы, передача ЭМ энергии.

### Introduction

Experimental and theoretical studies of plasma oscillations in metallic nanoparticles, in addition to purely scientific interest, are also of great practical importance [1–11]. In this case, as it shown by experiments [8, 12–20], the frequency both of the plasma and the light waves may coincide, but the length of the plasma wave will be significantly less than the length of the light wave [3, 14–21]. This fact allows to avoid the diffraction limits for light circuits when one transforms the light signal into the plasmon-polariton wave [4, 8, 9, 13, 15–18, 21]. It is found that one-dimensional periodic structures of metallic nanoparticles can serve as plasmon waveguides with low damping [4, 5, 14, 15, 20–23]. This is treated as prospective for the forthcoming construction of plasmon optoelectronic nano-devices that are not available in ordinary lightwave-guides, because of diffraction constraints. Therefore considered chains of nanoparticles can be successfully used in modern optoelectronic devices [2, 5, 6, 8, 15, 18, 21]. When studying plasma oscillations in nanoparticles as small as 5 nm or less, the method of quantum-mechanical density functional theory or the “local-density approximation” method (LDA) as well the “time-dependent LDA” method (TDLDA) are generally used [3–6, 8, 11].

The random phase approximation (or RPA-method) was developed as semi-classical scheme to describe volume plasmons in bulk metals (for simple metals) and it can be successfully applied when studying plasma oscillations as well in calculations concerning plasmon excitations in large metallic nanoparticles (metal spheres with radius about 10–100 nm) [9, 10, 19–24].

The volume plasma oscillations within metallic nanoparticles can give rise to forced oscillations on the surface of nanoparticles [9, 10]. As it already shown [10, 19–21], after arisen in *individual particles* plasma oscillations can attenuate due to the processes of electron scattering and radiation losses, through the Lorentz friction force in particular. Of course, the study of the properties of *ensembles of nanoparticles*, for example linear structures, is of the great practical interest: such structures can work as effective 1D-waveguides [1, 2, 4, 5, 8, 14, 15, 17, 20–23]. Researchers and technologists call such linear arrays of metal nanoparticles by nanoscale chains: these chains can be composed of nanoparticles of different shapes – rods, ellipses, spheres [4, 12, 15, 18, 20, 21].

As one can see from their geometric characteristics, similar linear arrays composed of metallic nanospheres

of radius  $a$  have two parameters – the nanosphere diameter  $2a$  and the distance  $d$  between the particles (most often it is the center-to-center distance). If we consider such a nanochain as a 1D periodic structure, then the nanoparticles are arranged equidistantly in it, i.e.  $d = \text{const}$ , and the value of  $d$  one can call as the period of a given linear structure.

The next question is the ratio of the distance  $d$  to the nanosphere radius  $a$ : it is most often one considered the ratio of  $d/a = 3$  to be closer to optimal [4, 5, 10, 13, 14, 19–23]. So, in this paper one considers exactly the same ratio.

Now about the total length  $L$  of such a linear array, or about the length  $L$  of a metal nanochain. Let it be that  $L = N \cdot d$ , where  $N$  is the number of such periods of the given structure. In order to be more formal, we can call the given array as “a long chain” if  $N \gg 1$ . But more often one considers that “the long nanochain” is an array that is longer than 500 nm.

This work is aimed to calculate within the framework of RPA method some characteristics of linear  $\perp$ - and  $\perp$ -shaped structures composed of silver nanospheres as EM waveguides placed into different dielectric medium and then analyze obtained results. Unlike other models and approaches to the similar problems of plasmon wave passage along 1D-arrays, this problem was solved accurately using RPA.

Let us consider a metallic nanoparticle of a spherical shape of radius  $a$ , which is placed in a dielectric medium ( $\epsilon \geq 1$ ,  $\mu = 1$ ) and located in an external alternating electric field. Suppose that the external magnetic field is zero. Let the material for a given nanosphere be a simple metal. Since we are only interested in the behaviour of conduction electrons of the metal nanosphere, we use the well known “jellium model” [24–26], which allows us to replace the positive charge of lattice ions by a uniformly distributed charge over the entire volume of a nanoparticle whose density is equal to  $n_e(r) = n_e \Theta(a - r)$ , where  $n_e = N_e/V$ ,  $n_e|e|$  – the average positive charge density,  $N_e$  – the number of conduction electrons in this nanosphere,  $V = 4\pi a^3/3$  is its volume,  $\Theta$  stands for the Heaviside step function.

Suppose that up to certain event (i.e.,  $t=0$ ) the electron gas of the metallic nanoparticle was in a state of equilibrium. Let it be at the time of  $t=0$  a homogeneous electric field appeared and immediately disappeared near this particle. As a result of this perturbation, surface dipole plasma oscillations arise in the metallic nanosphere. The dipole moment of the particle corresponding to these oscillations depends on time and emits electromagnetic waves, and the radiation of the electromagnetic wave, in turn, is accompanied by the force action  $\vec{f}_L$  of the emitted field on the electrons of the nanoparticle. This effect is called “radiation retardation” or Lorentz friction force [10, 19, 21]. The presence of this force is equivalent to the presence of an external effective electric field  $\vec{E}_L = \vec{f}_L(t)/eN_e$ , whose source is in the center of the metallic nanosphere. Thus, in this case, at  $t > 0$ , the time dependence of the dipole moment of a nanoparticle is given by the following equation (see [21, 23]):

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{D}(t) + \frac{2}{\tau} \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(t) + \omega_{p,h}^2 \vec{D}(t) = \epsilon_h \omega_{p,h}^2 a^3 \vec{E}_L(t), \quad (1)$$

where  $\omega_{p,h} = \omega_p / \sqrt{3\epsilon_h}$  – the intrinsic frequency of the dipole type surface plasmon;  $\omega_p$  – the plasma frequency of electron gas. The value  $1/\tau$  which enters into (1) (see [10, 19, 21]):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{v_F}{2} \left( \frac{1}{\lambda_B} + \frac{1}{a} \right) + \frac{\omega_{p,h}}{3} \left( \frac{a \cdot \omega_p}{c\sqrt{3}} \right)^3 = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\omega_{p,h}}{3} \left( \frac{a \cdot \omega_p}{c\sqrt{3}} \right)^3 \quad (2)$$

is the damping of plasma oscillations, which arises as a result of the interaction of conduction electrons with each other, as well as with the vibrations of the crystal lattice (the 1<sup>st</sup> term in (2)), and as a result of the interaction of the conduction electrons with the surface of the metallic nanoparticle (the 2<sup>nd</sup> term in (2)). The values  $v_F$  and  $\lambda_B$  represent the Fermi velocity and the mean free path of the electron in bulk metal, respectively. The 3<sup>rd</sup> term in (2) expresses taking into account the Lorentz friction in our considering.

Actually, here the first term of the sum of (2) (i.e.  $v_F/2\lambda_B$ ) describes the interaction of plasma oscillations with metal phonons and therefore grows with increasing temperature, but does not depend on the dimensions of the nanoparticle. The second term (i.e.  $v_F/2a$ ) describes the interaction of plasma oscillations with the surface of the nanoparticle, so it depends not on the temperature but on the radius of the nanoparticle.

It can be seen from relation (2) that the value of  $1/\tau$  grows at  $a \rightarrow 0$  and for  $a \rightarrow \infty$ , and the attenuation of dipole oscillations has its *minimum* value at the radii of metallic nanospheres equal to

$$a_0 = \frac{\sqrt{3}}{\omega_p} \sqrt[4]{\frac{c^3 v_F \sqrt{3}}{2}}. \quad (3)$$

The minimum attenuation at  $a = a_0$  means that at  $a > a_0$  the plasma oscillations damping increases with increasing radius of the nanosphere, and the eigen-frequency  $\omega_{p,h}^* = \omega_{p,h} / \sqrt{1 - 1/(\omega_{p,h} \cdot \tau)^2}$  of the dipole moment oscillations of a metallic nanoparticle decreases (to be more clear: it is for *individual* nanoparticle in a dielectric medium). When  $a < a_0$  the damping  $1/\tau$  value also increases: it means the eigen-frequency  $\omega_{p,h}^*$  decreases, but this time with a decrease of the radius  $a$  of the nanosphere [19–21]. This fact is confirmed experimentally [19, 20]. As for the corresponding calculations for silver nanoparticles, immersed into vacuum and Silica glass ( $\text{SiO}_2$ ,  $\epsilon_h = 3.8$  [27]) they show, that the radius  $a_0$  of minimal damping of plasmon oscillations for the metal is about 10 nm (see Table 1).

So, below one will consider some properties and characteristics of silver nanospheres of radius  $a_0$  (see Table 1), and then consider the waveguide efficiency of linear structures composed of nanoparticles of this size.

**Propagation of surface plasma oscillations along a linear chain composed of metal nanoparticles**

Consider a “long chain” composed of metallic nanoparticles of spherical shape of radius  $a_0$  and placed in a dielectric host medium with dielectric constant of  $\epsilon_h$ . Suppose that these nanospheres are located along the  $Z$  axis in such a way that their centers are at an equal distance  $d$  from each other: here is  $d = 3a_0$  (see Fig. 1). Since a nanochain more than 500 nm in length is usually considered to be “long”, for the current case the author considers linear arrays with  $N \geq 20$ .

Table 1

**The values of the Silver nanospheres radii, which correspond to the minimum attenuation coefficients (at 300 K)**

The host medium	The nanosphere radius $a_0$ , nm
vacuum ( $\epsilon_h = 1$ )	8.35

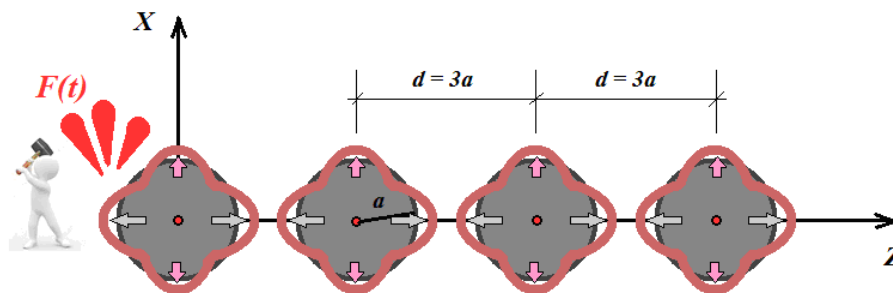
Let the origin of coordinates be in the center of one of the nanospheres (for example, for  $l=0$ ). Suppose that at time  $t=0$  there are plasma surface dipole oscillations arise under the influence of an external  $\delta$ -shaped electric field in metallic nanoparticles of the chain. These dipole oscillations induce a time-dependent electric dipole moment  $\vec{D}$ . Therefore, nanoparticles begin to emit electromagnetic waves, which, in turn, are absorbed by neighbouring particles. And this process – the radiation and absorption of electromagnetic waves by the nearest particles – is repeated many times in the described linear nanoscale array. Thus, collective excitations can propagate along the chain, i.e. dipole waves travel from one nanosphere to another.

Let the distance  $d$  between metallic nanoparticles be much smaller than the length of the electromagnetic wave  $\lambda$  emitted by any particle of the chain (i.e.  $d/\lambda \ll 1$ ). This is equivalent to the fact that the nanospheres which are adjacent to the selected particle will be in the dipole zone of the emitted electromagnetic wave. Here is the equation that describes such waves [21]:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2}{\tau_0} \frac{\partial}{\partial t} + \omega_{p,h}^2 \right) \vec{D}(t) = \omega_{p,h}^2 \epsilon_h a^3 \vec{E}(t). \tag{4}$$

The radiative losses of oscillating charges (that is plasmon dipole variations in time) can be displayed by the Lorentz friction [21, 28, 29]:  $\vec{E}_L = \frac{2}{3c^3} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \vec{D}(t)$ . So, one can rewrite (4) including the Lorentz friction term:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2}{\tau_0} \frac{\partial}{\partial t} + \omega_{p,h}^2 \right) \vec{D}(t) = \omega_{p,h}^2 \epsilon_h a^3 (\vec{E}(t) + \vec{E}_L). \tag{5}$$



**Fig. 1. A schematic representation of the linear array of metallic nanospheres of radius  $a$ , which are immersed into dielectric and spaced by a distance of  $d$  (here  $d = 3a_0$ )**

Substituting  $z = l \cdot d$  one can determine the dipole moment of the particle located at the  $l$ -th node of the considered infinite chain [21, 23]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2}{\tau_0} \frac{\partial}{\partial t} + \omega_{p,h}^2\right) D_z(ld, t) = \omega_{p,h}^2 \varepsilon_h a^3 \left( \sum_{\substack{m=-\infty \\ (m \neq l)}^{+\infty} E_z(R_m, R_{ml}, t) + E_{Lz}(ld, 0, t) + E_{0z}(ld, 0, t) \right) \quad (6a)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2}{\tau_0} \frac{\partial}{\partial t} + \omega_{p,h}^2\right) D_x(ld, t) = \omega_{p,h}^2 \varepsilon_h a^3 \left( \sum_{\substack{m=-\infty \\ (m \neq l)}^{+\infty} E_x(R_m, R_{ml}, t) + E_{Lx}(ld, 0, t) + E_{0x}(ld, 0, t) \right) \quad (6b)$$

The Equations (6a) and (6b) describe the dipole-type coupling between the arranged nanospheres (Fig. 2). As one can see, all the terms in (6a) and (6b) are “dimension-sensitive” values, i.e. they rigidly depend on the geometric parameters of such waveguides.

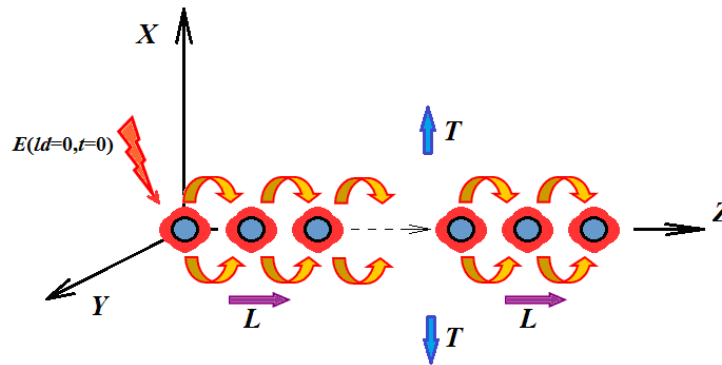


Fig. 2. The illustration of surface plasma oscillations propagation along a linear array made up of spherical metallic nanoparticles: the process is based on the dipole-type coupling between the arranged nanospheres

Let us analyze the electric field “behavior” of propagating plasma oscillations caused by an external source of the field at the frequency range near the resonance of a given system of nanoparticles. When solving these Equations (6a) and (6b) using the Fourier transformation with the corresponding boundary conditions and nearby the resonance frequencies, one can obtain the following equations concerning the electric field strength  $E_{z,x}(ld, a, t)$  of the travelling plasmon wave:

$$E_z(ld, a, t) = \frac{2}{3} \omega_{p,h}^2 b_{0z}(\phi) E_{0z}(0,0) \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_h} - \frac{2aF_z}{c\sqrt{\varepsilon_h}} \cos(u_{0z}l) \cdot \sin(F_z t + \delta_{0z}(F_z)) \right); \quad (7a)$$

$$E_x(ld, a, t) = -\omega_{p,h}^2 b_{0x}(\phi) E_{0x}(0,0) \times \left[ 1 - \frac{R_\omega F_x}{\omega_{p,h}} \cos(u_{0x}l) \cdot \left( \sin(F_x t + \delta_{0x}(F_x)) + \frac{R_\omega F_x}{\omega_{p,h}} \cos(F_x t + \delta_{0x}(F_x)) \right) \right] \quad (7b)$$

Here (for both polarizations –  $z$  and  $x$ , i.e. the longitudinal and transverse ones) one has:

- $E_{0z,x}(0,0)$  – the amplitudes of the electric field strength oscillations at “starting” node, i.e. that node of the nanoscale metallic chain where the external source of the field is located;
- $u_{0z,x} \in [0; 2\pi]$ ;
- $b_{0z,x}(\phi) = 1 / \sqrt{(\omega_{0z,x}^2 - F_{z,x}^2)^2 + 4F_{z,x}^2 / \tau_0^2}$ ;
- $\delta_{0z,x}(F_{z,x}) = \arctg\left(\frac{2F_{z,x}}{\tau_0(\omega_{0z,x}^2 - F_{z,x}^2)}\right)$ .

Then let it be:  $F_{z,x} = P_{z,x} (1 + \phi / P_{z,x})$ , where the following is true:

$P_z = \omega_{p,h} \cdot \sqrt{1 - 4(a/d)^3 \cos(\pi Q_z / 2)}$	$P_x = \omega_{p,h} \cdot \sqrt{1 + 2(a/d)^3 \cos(\pi Q_x / 2)}$
$Q_z = 1 - \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{9}{\pi^2} \left[ R^2 + \frac{v_F}{R} \left( \frac{\sqrt{3\varepsilon_h}}{\lambda_B \omega_p} + \frac{1}{cR} \right) \right]}$	$Q_x = 1 - \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{9}{\pi^2} \left[ R^2 + \frac{2v_F}{R} \left( \frac{\sqrt{3\varepsilon_h}}{\lambda_B \omega_p} + \frac{1}{cR} \right) \right]}$



$$R = \omega_p a / c\sqrt{3};$$

-  $\phi = |\omega_{z,x(1D)} - \omega_{0z,x}|$ , where  $\omega_{z,x(1D)} = 1/\sqrt{\omega_{0z,x}^2 - 1/\tau_0^2}$  is the frequency of the eigenwaves in a 1D-array composed of the same particles. And  $\phi$  is such value that is true:  $\phi/P_{z,x} \ll 1$  and  $F_{z,x}^2 - P_{z,x}^2 \approx 2\phi \cdot P_{z,x}$ .

And Her Majesty Practice asks its own questions, for example: what will the attenuation of the signal be in case of passing of it through such branch structures as  $\perp$ -corners and/or  $\perp$ -junctions?

Of course, when solving this problem, it is necessary to take into account such basic principles of Nature as continuity of EM waves and the conservation laws.

In this (the current) case, these will be two *rules*: the continuity of plasmonic waves and the law of conservation of the EM-energy flux [26, 30]. And it is well known fact that the efficiency of the EM-signal travelling depends on the geometry of the certain structure, the signal frequency, and polarization directions of the plasmonic waves that enter and exit the structure [4]. In this paper basic (and the simplest!) junctions are considered:  $\perp$ -junctions (i.e. 90°-corners) and  $\perp$ -junctions.

A signal travels along the chain, and after reaching the particle that can be called a *splitting node* the signal splits and can change its own polarization. In the figures (*see insets in Table 3*) this particle is marked with a circle. If a signal  $E_{input} = E(ld = 0; a = a_0; t = 0)$  appears at the input of the structure, then its output intensity  $E_{output}$  can be calculated. Results of signal attenuation calculating are shown below. Note that the length of each bend (“shoulders”) in these junctions is 500 nm.

Calculations of the signal damping were made for nanoscale one-dimensional waveguides: the author considered chains of silver spherical nanoparticles as such waveguides placed into different dielectric media, for example, in vacuum ( $\epsilon_h = 1$ ) and Silica glass ( $\text{SiO}_2$ ,  $\epsilon_h = 3.8$  [27]). All the parameters of signal damping are calculated for the ambient temperature of 300 K. In the table below one can see the results of calculations of the signal damping when it runs along linear nanosized waveguides composed of silver spherical nanoparticles of radius  $a = a_0$  (*see Table 1 above*) and spaced by distance of  $d = 3a_0$ . Since it was considered nanoscale metallic chains composed of nanospheres of certain size of  $a_0$ , then we can expect maximum efficiency of signal travelling via the waveguide. In his calculations the author assumed that the total length of the metallic nanochain exceeded 500 nm.

The presented data below show some characteristics concerning to the signal attenuation when it (the signal) travels along a straight metallic nanochain (*see Table 2*), and the signal runs along 1D bent and branched waveguides (*see Table 3*). In both cases the waveguides were placed in dielectrics.

The Table 2 shows the obtained data on attenuation of the signal intensity when it runs along the mentioned nanosized silver waveguides for different dielectric medium. One considers two characteristics of signal transmission for both polarization modes – the Power Transmission Coefficients ( $\text{PTC}_{L,T}$ ) and the Linear Attenuation Rates ( $\text{LAR}_{L,T}$ ) per 500 nm of waveguide length. It is obviously that the signal transfers with high efficiency along the mentioned waveguides under the given conditions.

Table 2

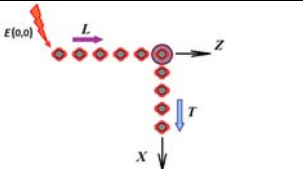
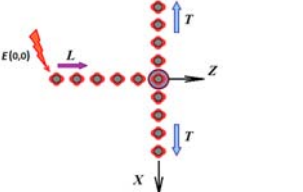
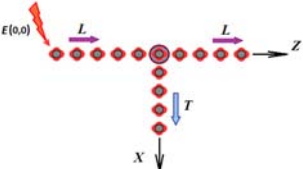
**Attenuation of the Signal Intensity when it travels along the mentioned nanosized waveguides for different dielectric medium: the Power Transmission Coefficient ( $\text{PTC}_{L,T}$ ) and the Linear Attenuation Rate ( $\text{LAR}_{L,T}$ )**  
(silver nanospheres, radius  $a = a_0$ , center-to-center distance  $d = 3a_0$ ,  $T^\circ = 300$  K)

The Host Medium	Longitudinal Propagation		Transversal Propagation	
	radius = $a_0$ ( <i>see Table 1</i> )		radius = $a_0$ ( <i>see Table 1</i> )	
	$\text{PTC}_L$ , a.u.	$\text{LAR}_L$ , dB/500nm	$\text{PTC}_T$ , a.u.	$\text{LAR}_T$ , dB/500nm
vacuum ( $\epsilon_h = 1$ )	0.894	0.97	0.934	0.60
$\text{SiO}_2$ ( $\epsilon_h = 3.8$ )	0.882	1.09	0.930	0.63

As for the next question – on signal travelling through curves and branches: the author had chosen three structures and calculated the corresponding parameters – the power transmission coefficients (*see Table 3*).

**The Signal Intensity when it travels along Silver nanosized waveguides through  $\perp$ -corners and  $\perp$ -junctions for different dielectric medium: the Power Transmission Coefficient (PTC<sub>L,T</sub>)**

(Ag-nanospheres, radius= $a_0$ , center-to-center distance  $d = 3a_0$ ,  $T^\circ=300$  K)

The Type of Junction	Vacuum ( $\epsilon_h = 1$ )		SiO <sub>2</sub> ( $\epsilon_h = 3.8$ )		by M. Brongersma <i>et al.</i> [4]
	$E_{z\_input} =$	0.882	$E_{z\_input} =$	0.894	---
	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.820	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.835	0.889
	$E_{z\_input} =$	0.882	$E_{z\_input} =$	0.894	---
	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.410	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.417	0.500
	$E_{z\_input} =$	0.882	$E_{z\_input} =$	0.894	---
	$E_{z \rightarrow z\_output} =$	0.453	$E_{z \rightarrow z\_output} =$	0.472	0.640
	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.429	$E_{z \rightarrow x\_output} =$	0.422	0.320

The Table 3 presents the calculated data concerning to the intensity of the signal that passes along the Ag-nanochain and reaches its certain point – the special node of the waveguide which causes a reversal of the signal polarization (in the picture the point is marked with a circle). It is assumed that up to this point and from this point the travelling signal will pass through equal “shoulders” (pathways) which are 500 nm of length. So, “input” and “output” represent input and output values of the signal intensity correspondingly. For comparison, one can see the values of the calculated intensities taken from the study of M.L. Brongersma *et al.* [4].

### Summary

In this paper it is reported on calculating of two characteristics of signal transmission through bent and/or branched nanoscale waveguides – the Power Transmission Coefficients (PTC<sub>L,T</sub>) and the Linear Attenuation Rates (LAR<sub>L,T</sub>) per 500 nm of waveguide length.

An important feature of this study was consideration of the plasmonic waves' passage through a 1D-array of Ag-nanospheres of the special size – of the radius  $a_0$  which provides minimum signal damping.

These two characteristics of signal transmission were found for both polarization modes – for the Longitudinal and the Transverse ones. The computed values were obtained within RPA and they are exact solutions of the problem. The obtained results are in good agreement with similar results of other researchers.

These calculated values of the attenuation rate of plasmon waves (*see* Table 2) can indicate a high efficiency of this described above method of transmitting EM-energy along such waveguides. The author believes that such nanoscale waveguides can be successfully used for subwavelength transmission lines within integrated optics circuits.

### References

1. M. Quinten, A. Leitner, J.R. Krenn, and F.R. Aussenegg, “Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles,” *Optics Letters*, vol. 23 (17), pp. 1331–1333, 1998.
2. K. Kawano, T. Kitoh. *Introduction to optical waveguide analysis*. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 2001, 271 p.
3. W.L. Barnes, A. Dereux, and T.W. Ebbesen, “Surface plasmon subwavelength optics,” *Nature*, vol. 424, pp. 824–830, 2003.
4. M.L. Brongersma, J.W. Hartman, and H.A. Atwater, “Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit,” *Phys. Rev. B*, vol. 62, n. 24, pp. R16 356–R16 359, 2000.
5. S.A. Maier, M.L. Brongersma, P.G. Kik, S. Meltzer, A.A.G. Requicha, and H.A. Atwater, “Plasmonics – a route to nanoscale optical devices,” *Advanced Materials*, vol. 13, issue 19, pp. 1501–1505, 2001.
6. A.V. Zayats, I.I. Smolyaninov, and A.A. Maradudin, “Nano-optics of surface plasmon polaritons,” *Phys. Rep.*, vol. 408, pp. 131–314, 2005.
7. J.M. Pitarke, V.M. Silkin, E.V. Chulkov, and P.M. Echenique, “Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons,” *Rep.Prog.Phys.* vol. 70, pp. 1–87, 2007.

8. S.A. Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*. New York: Springer-Verlag US, 2007, 224 p.
9. L. Jacak, Yu.P. Krasnyĭ, and A.O. Chepok, "A theory of plasma oscillations in metallic nanoparticles," *Low Temp. Phys.*, vol. 5 (35), pp. 383–393, 2009.
10. J. Jacak, J. Krasnyĭ, W. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, and L. Jacak, "Surface and volume plasmons in metallic nanospheres in a semiclassical RPA-type approach: near-field coupling of surface plasmons with the semiconductor substrate," *Phys. Rev. B*, vol. 82, pp. 035418–035431, 2010.
11. M.I. Stockman, "Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future," *Optics Express*, vol. 19, No. 22, pp. 22029–22106, 2011.
12. S.A. Maier, M.L. Brongersma, and H.A. Atwater, "Electromagnetic energy transport along arrays of closely spaced metal rods as an analogue to plasmonic devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1 (78), pp. 16–18, 2001.
13. S.A. Maier, M.L. Brongersma, P.G. Kik, and H.A. Atwater, "Observation of near-field coupling in metal nanoparticle chains using far-field polarization spectroscopy," *Phys. Rev. B*, vol. 19 (65), pp. 193408–193411, 2002.
14. S.A. Maier, P.G. Kik, and H.A. Atwater, "Observation of coupled plasmon-polariton modes in Au nanoparticle chain waveguides of different lengths: estimation of waveguide loss," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 1714–1716, 2002.
15. S.A. Maier, P.G. Kik, and H.A. Atwater, "Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides," *Phys. Rev. B*, vol. 20 (67), pp. 205402–202406, 2003.
16. S.A. Maier, P.G. Kik, H.A. Atwater, S. Meltzer, E. Harel, B.E. Koel, and A.A.G. Requicha, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides," *Nat. Mater.*, vol. 2 (4), pp. 229–232, 2003.
17. S.A. Maier and H.A. Atwater, "Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 1 (98), pp. 011101–011110, 2005.
18. R. Könenkamp, R.C. Word, and J.P.S. Fitzgerald, "Visualization of optical wave propagation in femtosecond photoemission electron microscopy," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 19 (Suppl. 2), pp. 306–307, 2013.
19. W. Jacak, J. Krasnyĭ, J. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, L. Jacak, D.Z. Hu, and D. Schaadt, "Radius dependent shift in surface plasmon frequency in large metallic nanospheres: theory and experiment," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, pp. 124317–124329, 2010.
20. W. Jacak, J. Krasnyĭ, J. Jacak, A. Chepok, L. Jacak, W. Donderowicz, D.Z. Hu, and D.M. Schaadt, "Undamped collective surface plasmon oscillations along metallic nanosphere chains," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 084304–084318, 2010.
20. W.A. Jacak, J. Krasnyĭ, and A. Chepok, "Plasmon-Polariton Properties in Metallic Nanosphere Chains," *Materials*, vol. 7 (8), pp. 3910–3937, 2015.
21. A.O. Chepok, "On basic features of EM signal transporting along linear waveguides composed of noble metal nanospheres," *Int. Sci.-Tech. magaz. "Measuring & Comput. Devices in Technol. Processes"*, vol. 3 (52), pp. 161–165, 2015. available at: [http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf\\_full/2015/vottp-2015-3.pdf](http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf_full/2015/vottp-2015-3.pdf)
22. A.O. Chepok, "Calculation of the linear attenuation rate for 1-Dimensional nanosized waveguides," *Int. Sci.-Tech. magaz. "Measuring & Comput. Devices in Technol. Processes"*, vol. 2 (58), pp. 63–68, 2017. available at: [http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf\\_full/2017/vottp-2017-2.pdf](http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf_full/2017/vottp-2017-2.pdf)
23. D. Bohm, *Quantum theory*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1958, 393 p.
24. A. Kiejna and K.F. Wojciechowski, *Metal surface electron physics*. Pergamon, 1996, 312 p.
25. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Electrodynamics of continuous media*. Oxford Pergamon Press, 1960, 417 p.
26. M.J. Weber, *Handbook of optical materials*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2003, 499 p.
27. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Course of theoretical physics, vol. 2. The Classical theory of fields*, 4 Edition. Butterworth-Heinemann, 1975, 402 p.
28. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Field theory*. Nauka: Moscow, Russia, 1973.
29. J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd Edition. Wiley, 1998, 832 p.

Рецензія/Peer review : 2.10.2018 p.

Надрукована/Printed :25.11.2018 p.  
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

А.Ю. ВОЛОВИК, Д.В. ГАВРИЛОВ, В.С. МОЗГОВИЙ  
Вінницький національний технічний університет

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТРАЄКТОРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ПОСАДКОВОЇ СИСТЕМИ

*Об'єкт дослідження являє собою процес перетворення інформаційних сигналів у бортовому радіоканалі системи посадки сантиметрового діапазону під час виконання посадкового маневру. Мета роботи спрямована на створення програмно-керованого оперативного контролю поточної точності та достовірності вимірювань кутів координат на борту повітряного судна шляхом застосування методів оптимальної дискретної фільтрації за умови, що вони сприяють спрощенню технічної реалізації за критерієм «точність – об'єм обчислювальних ресурсів». Запропоновано декілька варіантів практичної реалізації дискретного фільтра Калмана. Достовірність отриманих результатів підтверджена шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло.*

*Ключові слова:* динамічна система, дискретний фільтр Калмана, метод Монте-Карло, система посадки сантиметрового діапазону.

A.YU. VOLOVIK, D.V. HAVRILOV, V.S. MOZGOVOI  
Vinnytsia National Technical University

## DEVELOPMENT OF TRAJECTORY SUPERVISION MODEL FOR LANDING AVIATION SYSTEM

*The purpose of work is directed to creation of a program-controlled operating control of the current accuracy and reliability of angular data measurements onboard the air vehicle by application of optimum discrete filtering methods provided that they promote simplification of technical implementation by criterion "accuracy - the volume of computing resources". Relevance of such task is defined by the next fact: malfunctions in work of radio engineering devices happen rather infrequently and the most part of time the an angle measurement channel works correctly; introduction of special methods signals processing should not worsen the accuracy of measurements in rated conditions; at emergence of malfunctions it is reasonable to use the principle of heredity and expansion of classical methods functionality of signals processing. The object of research represents process of information signals transformation in an onboard radio channel of a centimetric range landing system during performance of landing manoeuvre. The mathematical model of advanced dynamic process of a change angular position airplane in time which unlike the known results considers not only airplane tactical technical characteristics, and also feature of a flight run on separate trajectory of a landing path is constructed by taking into account a number of simplifications. An opportunity to describe mathematical model of dynamic process by system of the difference vector equations is represented, inasmuch as, angle place data in centimetric range landing systems are updated discretely with a certain frequency. Necessary initial numerical data of a system state vector and complete correlation matrixes are received on the basis of experience of relevant systems practical operation. Minimum necessary order of model is defined. On the basis of Kalman's method the optimum filter for processing of a primary flow of the corner airplane place measurements is synthesized. A priori set model of the airplane movement which carries out forecast function and the adjusting feedback link is its part. The weighed residual is entered into model as perturbation. It allows to consider a Kalman filter not only as computing algorithm, and as the device of digital type tracking which provides minimum possible mean average squared error both in transient and instable the conditions. The analysis of optimum filter efficiency is carried out. Several options of a discrete Kalman filter practical implementation are offered. Two best options are defined by results of comparative analysis. The assessment of their accuracy and computing efficiency is given. Reliability of the received results is confirmed by statistical modelling the Monte-Carlo method.*

*Keywords:* dynamic system, discrete filter of Kalman, Monte-Carlo method, system of landing of centimetric range.

### Вступ та постановка задачі

Гарантування безпеки посадки повітряного судна (ПС) завжди являло і являє собою складну технічну проблему. Її актуальність підтверджується майже столітньою історією розвитку авіаційної техніки. Більше того, динаміка розвитку посадочних засобів така, що вимоги до надійності та точності процесу посадки ПС завжди випереджали їх технічні можливості [1]. У цьому сенсі інструментальні системи посадки СП-50, СП-70 та їх закордонний аналог ILS (Instrument Landing System) не є винятком. Так, наприклад, згідно даних Міждержавного Авіаційного Комітету (МАК) та Фонду безпеки польотів США до 85% льотних пригод трапляються на етапах заходу на посадку, приземлення або зльоту [2]. Кардинальне розв'язання вище згаданої проблеми можливе лише за рахунок уведення комплексу заходів, пов'язаних перш за все з чіткою організацією роботи усіх аеродромних служб та оснащенням аеропортів і літаків спеціальною апаратурою, яка допускає автоматизацію процесу посадки ПС за I–III категорією метеорологічних умов ICAO (International Civil Aviation Organization) з високими показниками надійності, а саме імовірність льотної пригоди повинна бути не більшою від регламентованої норми  $10^{-7}$ . Причому інформаційна складова цього комплексу стала настільки важливою, що у квітні 1972 р. у ICAO було прийнято рішення про розгортання пошукових робіт з метою створення нового стандарту системи посадки. Новим стандартом передбачалось виділити для цієї системи радіочастоти у діапазоні 5.05–5.25 ГГц та 15.4–15.7 ГГц. У зв'язку з цим, вона отримала офіційну назву Microwave Landing System – система посадки сантиметрового діапазону [3], і ґрунтувалась на використанні часового способу кодування інформації про куту координату. Навесні 1978 р. новітня система посадки отримала міжнародний статус і де-факто стала стандартом ICAO на перспективу після 2000 року. Тут підвищені точність та достовірність результатів спостережень кутів координат забезпечуються надмірністю формату радіосигналу, новим принципом їх

отримання на борту ПС, та методами обробки радіосигналів, що базуються на використанні сучасних інформаційних технологій. Загально визнаним методом вирішення таких задач є використання фільтрів Калмана. Проте, ефективне застосування методів оптимальної фільтрації передбачає повноту апріорної інформації про стан кутомірної каналу, характеристик діючих збурень та завад, математичну модель динаміки кутових координат ПС при заході на посадку.

**Мета роботи** спрямована на створення програмно-керованого оперативного контролю поточної точності та достовірності вимірювань кутових координат на борту ПС шляхом застосування методів оптимальної дискретної фільтрації за умови, що вони сприяють спрощенню технічної реалізації за критерієм «точність – об’єм обчислювальних ресурсів». Мотивом для такої постановки задачі може слугувати той факт, що несправності у роботі радіотехнічних пристроїв трапляються відносно нечасто і більшу частину часу кутомірний канал працює коректно. Уведення спеціальних методів обробки сигналів не повинно погіршувати точність вимірювань за наявності номінальних умов, а при появі несправностей доцільно скористатись принципом спадкоємності та розширення функціональних можливостей класичних методів обробки сигналів [4, 5].

**Обґрунтування та розробка моделі траєкторних спостережень**

Серед вище перерахованих елементів, одним з головних є поняття динамічної моделі, оскільки за її допомогою здійснюється зв’язок між реальною фізичною задачею, у якій будуть використовуватись результати фільтрації та областю математичних абстракції, у якій будується ці результати. Математичну модель прийнято будувати на основі всебічного аналізу поведінки досліджуваного процесу з використанням результатів раніш проведених досліджень. Вона повинна бути достатньо повною, щоб адекватно описувати динаміку процесу, проте і достатньо простою, щоб отримані схеми обробки можливо було реалізувати на практиці [6]. На сьогоднішній день опис динамічних процесів та систем переважно виконується методом простору станів.

Побудову динамічної моделі кута місця ПС при виконанні посадкового маневру почнемо з введення низки спрощень, виділивши у процесі руху чотири послідовно виконуваних ділянки польоту (рис. 1).

1. Ділянка горизонтального польоту 1–2 на висоті приблизно 200 метрів, яка починається з віддалі близько  $D_1 = 15000$  м і до  $D_2 = 5000$  м по відношенню до місця розташування глісадного радіомаяка. Є підстави вважати [7], що на цій ділянці ПС рухається рівносповільнено, а швидкість польоту спадає приблизно з 150 до 100 м/с.

2. Ділянка планування являє собою рух з вибраним (залежно від класу ПС) кутом нахилу глісади, починаючи з віддалі приблизно  $D_2 = 5000$  м до  $D_3 = 750$  м зі зниженням висоти від  $H_2 = 200$  м до висоти прийняття рішення про приземлення  $H_3 = 30$  м з подальшим погашенням швидкості від  $V_2 = 100$  м / с до  $V_3 = 80$  м/с .

3. Ділянка вирівнювання. На цій ділянці польоту дані від глісадного радіомаяка не використовуються. Вирівнювання здійснюється, чи то за допомогою спеціальної апаратури наведення, чи то з використанням далекоміра, розташованого за злітно-посадковою смугою на віддалі біля 300 метрів від задньої її границі та бортового радіовисотоміра.

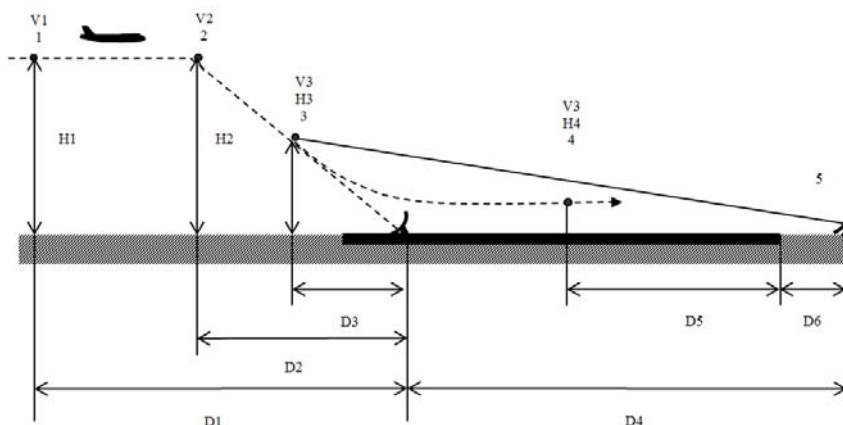


Рис. 1. Ідеалізована траєкторія руху ПС у вертикальній площині в процесі виконання посадкового маневру:  
 1–2 – ділянка горизонтального польоту; 2–3 – ділянка планування з заданим кутом нахилу глісади;  
 3–4 – ділянка вирівнювання; 4 – точка дотику ЗПС з наступною пробіжкою;  
 5 – місце встановлення апаратури наведення для вирівнювання

Виходячи з вищенаведених спрощень, проведемо розрахунок параметрів траєкторії руху ПС за кутом місця, використовуючи наступні співвідношення:

$$\beta(t) = \arctg \frac{H(t)}{D(t)}; \quad \beta'(t) = \frac{H'(t)D(t) - H(t)D'(t)}{H^2(t) + D^2(t)}$$

$$\beta''(t) = \frac{\{[H''(t)D(t) - H(t)D''(t)] - 2[H'(t)D(t) - H(t)D'(t)][H'(t)H(t) + D(t)D'(t)]\}}{H^2(t) + D^2(t)}, \quad (1)$$

де  $\beta(t), \beta'(t), \beta''(t)$  – кут місця ПС, швидкість його зміни та прискорення ПС за кутом місця, відповідно;  $D(t), D'(t), D''(t)$  – горизонтальна віддаль до глісадного радіомаяка, швидкість її зміни та прискорення ПС у напрямку повздовжньої вісі злітно-посадкової смуги, відповідно;  $H(t), H'(t), H''(t)$  – висота польоту ПС, швидкість її зміни та вертикальна складова прискорення, відповідно. Слід зауважити, що на ділянці вирівнювання поточна віддаль визначається по відношенню до місця встановлення елемента наведення для вирівнювання. Характер залежності параметрів траєкторії повітряного судна від часу при виконанні посадкового маневру показано на рис. 2.

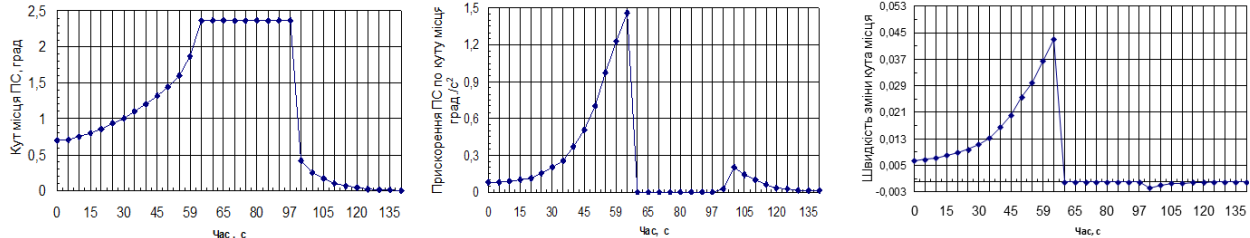


Рис. 2. Характерні зміни параметрів динамічного процесу при заході ПС на посадку

Прийнятність та адекватність побудованих оцінок кутового місцезнаходження ПС значною мірою залежить від того наскільки правильно математична модель відображає найбільш суттєві риси динамічного процесу, що описує зміну кута місця ПС при виконанні посадкового маневру. Звернувшись до рис. 2, неважко помітити, що для спрощеного опису монотонно зростаючої залежності кута місця ПС від часу на ділянці горизонтального польоту, доцільно застосувати динамічну модель другого порядку. Вона є коректною для часових інтервалів, для яких справедливі співвідношення  $\sigma_\beta \gg 0,5|\beta''(t)_{\max}|T^2$ , де  $\sigma_\beta$  – середньоквадратична похибка первинних вимірювань кута місця ПС;  $T$  – інтервал екстраполяції;  $\beta''(t)_{\max}$  – максимально можливе прискорення ПС по куту місця. Питання вибору динамічної моделі на ділянці планування можливо вирішувати з таких міркувань:

1. Перехід до режиму планування, як правило, виконується шляхом виконання відповідного маневру з метою схоплення потрібної глісади, при цьому важлива швидка стабілізація ПС на вибраній траєкторії.

2. Однією з головних небезпек при заході на посадку є турбулентність атмосфери. Сама непередбачувана та небезпечна її форма, так званий «вітровий зсув». Якщо вітровий потік поблизу земної поверхні прямує до низу, то є досить велика імовірність раптової втрати висоти ПС. Єдиним виходом з такого стану є збільшення тяги двигунів з метою швидкого відновлення розташування ПС на заданій глісаді планування [7, 8].

За таких умов використання фільтра першого порядку буде призводити до появи значних динамічних похибок та повільної їх збіжності до ustalених значень. З врахуванням цих обставин доцільно розширити смугу пропускання фільтра за рахунок збільшення порядку динамічної моделі (до другого). Монотонно спадаюча у часі залежність кута місця ПС на етапі вирівнювання також допускає можливість її опису моделлю другого порядку. Проте слід зауважити, що у момент прийняття рішення про приземлення на висоті 30 метрів змінюється підсистема наведення і дані від кутомірного радіоканалу уже не використовуються.

Більш детальний опис математичної моделі динаміки кута місця ПС подамо на прикладі ділянки горизонтального польоту. Згідно прийнятої моделі руху ПС, вважаємо що швидкість зміни кута місця ПС є постійною величиною, але наперед невідомою, невраховані прискорення та вплив атмосферної турбулентності будемо розглядати як збурення номінальної траєкторії. У цьому випадку математична модель може бути описана рівнянням у термінах простору станів [8]:

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{a}(t); \quad (2)$$

де  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t)]^T$  – вектор стану, компонентами якого є значення кута місця ПС  $\beta(t)$  та швидкості його зміни  $\beta'(t)$ , відповідно;  $\mathbf{a}(t)$  – випадкове прискорення ПС за кутом місця  $\beta''(t)$ ;  $\mathbf{F}(t), \mathbf{G}(t)$  – системні матриці. Оскільки кутові дані у СП сантиметрового діапазону оновлюються дискретно з частотою 40.5 Гц ( $T = 0.0247$  с), то рівняння (2) слід привести до різницевого

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{w}(k), \quad (3)$$

де  $\mathbf{A}(k+1, k)$  – перехідна матриця системи, яка пов'язана з матрицею  $\mathbf{F}(t)$  інтегральним співвідношенням

$$\mathbf{A}(k+1, k) = \exp\left[\int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{F}(t)dt\right] = \exp(\mathbf{F}T); \quad T = (t_{k+1} - t_k) - \text{інтервал дискретизації};$$

$$\mathbf{w}(k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{A}(t_{k+1}, t) \mathbf{G}(t) \mathbf{a}(t) dt - \text{дискретний білий шум збурень. З огляду на роботи [7], неважко показати,}$$

що

$$\mathbf{A}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_k [1 + T/\tau_k + \exp(-T/\tau_k)] \\ 0 & 1 & \tau_k [1 - \exp(-T/\tau_k)] \\ 0 & 0 & \exp(-T/\tau_k) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}(k) = 2 \frac{\sigma_{\text{KM}}^2}{\tau_k} \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix},$$

де  $\mathbf{Q}(k)$  – кореляційна матриця шумів збурень;  $\sigma_{\text{KM}}^2$  – дисперсія випадкового маневру ПС по куту місця, (град/с<sup>2</sup>)<sup>2</sup>;  $\tau_k$  – інтервал кореляції випадкових прискорень, с. За заданого інтервалу дискретизації  $T$  ( $T \ll 1$ ), кореляційна матриця  $\mathbf{Q}(k)$  шумів збурень може бути суттєво спрощена, наприклад:

– при  $T/\tau_k \rightarrow \infty$ , що відповідає випадку відсутності корельованих прискорень, перехідна матриця

$\mathbf{A}(k+1, k)$  описує рух з постійною швидкістю;

– при  $T/\tau_k \rightarrow 0$ , розвинення експоненти у степеневий ряд з утриманням перших трьох членів, дає можливість описувати рівноприскорений рух без збурень;

Необхідні початкові числові дані про вектор  $\mathbf{x}(0)$ , кореляційні матриці  $\mathbf{Q}(k)$  та  $\mathbf{R}(k)$  можна отримати на основі набутого практичного досвіду [8]:

1. Для широкого класу ПС діапазон віддалей заходу на посадку коливається у межах 5–25 км, а діапазон посадкових швидкостей 200–500 км/год., можливі прискорення рідко перевищують 0.1–0.25 g [8]. Тоді, як показали розрахунки за формулами (1)–(2), у якості початкових значень параметрів номінальної траєкторії можна прийняти:

- 0.7 град. – початкове значення кута місця ПС;
- 0.0122 град./с – початкове значення швидкості зміни кута місця;
- 0.0002 град./с<sup>2</sup> – початкове значення прискорення ПС по куту місця;
- верхня межа дисперсії похибок первинних бортових вимірювань кута місця ПС оцінюється величиною у  $50 \cdot 10^{-4}$  (град.)<sup>2</sup>.

2. Порядок величини  $\mathbf{Q}(k)$  оцінимо на основі формули (2), у яку замість  $D''(t)$  слід підставити величину середньоквадратичного прискорення, що визначається як  $\sigma_a^2 = a_{\text{max}}^2 (1 + 4q_{\text{max}} - q_0)/3$ , де  $a_{\text{max}}$  – максимальне припустиме прискорення для даного класу ПС;  $q_0$  – ймовірність того, що маневру не буде;  $q_{\text{max}}$  – ймовірність того, що маневр буде потрібен з прискоренням  $a_{\text{max}}$ . У інших випадках передбачається, що ПС може приймати будь-які прискорення з діапазону  $[-a_{\text{max}}, +a_{\text{max}}]$  з рівномірною густиною розподілу ймовірностей  $1 - (2q_{\text{max}} + q_0)/2a_{\text{max}}$ . Наприклад на заключному етапі горизонтального польоту  $D = 5000$  м при  $H = 200$  м;  $q_{\text{max}} = 0,1$ ;  $q = 0,5$ ;  $a_{\text{max}} = 0,2g$  дисперсія прискорення по куту місця розрахована на основі формули (2) становить  $\sigma^2 = 7 \cdot 10^{-4}$  (град / с<sup>2</sup>)<sup>2</sup>.

Величина  $\tau_k$ , може приймати значення від 0.01 до 1 с (для випадкових збурень, обумовлених турбулентністю атмосфери). Якщо покласти  $\tau_k = 1$  с, то величина  $\mathbf{Q}(k)$  для віддалей  $D = 10000$  м і  $D = 1000$  м оцінюється у  $3.6 \cdot 10^{-8}$  (град. / с<sup>2</sup>)<sup>2</sup> та  $11.5 \cdot 10^{-4}$  (град./ с<sup>2</sup>)<sup>2</sup>, відповідно. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що на великих віддальях шумами маневру можна знехтувати і використовувати модель руху ПС без збурень. При невеликих віддальях, навпаки, слід користуватися моделлю руху ПС з постійною швидкістю та наявністю шуму маневру, тому що у цьому випадку стохастичні складові прискорення відіграють домінуючу роль. Щодо математичної моделі первинних бортових вимірювань, то її прийнято описувати рівнянням:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \xi(k), \tag{4}$$

де  $\mathbf{y}(k)$  – вектор спостережень,  $\mathbf{C}(k)$  – матриця спостережень, структура якої визначається типом вимірювальних засобів та їх числом;  $\mathbf{x}(k)$  – вектор стану,  $\xi(k)$  – похибки первинних вимірювань кутових координат. У загальному випадку похибки первинних вимірювань мають досить складну структуру. Проте похибки одиничних вимірювань завжди містять флуктуаційну складову, дисперсія якої залежить від відношення сигнал / шум на вході радіовимірювального тракту та дискретності надходження посадкових даних. Вважають, що ця складова змінюється випадково, розподілена за нормальним законом з нульовим середнім значенням та кореляційною матрицею, оцінку якої можна отримати скориставшись графіком [4]. Таким чином, з достатньою для практики точністю, математична модель динамічного процесу зміни кутових даних, які надходять з каналу первинних радіовимірювань у систему вторинної обробки, може бути описана системою різницевих векторних рівнянь



$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{w}(k); \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\mathbf{x}(k) = [\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k)]^T$  – значення кута місця ПС та швидкості його зміни у поточний момент часу  $k$ ;  
 $\mathbf{A}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}(k+1, k) = [0 \ 1]^T$ ,  $\mathbf{C}(k) = [1 \ 0]$  – системні матриці;

$\mathbf{w}(k), \mathbf{n}(k)$  – гаусові білі послідовності з нульовим середнім значенням та апіорно заданими кореляційними матрицями  $\mathbf{Q}(k), \mathbf{R}(k)$ . Системі рівнянь (5) відповідає структура, яка складається з дискретного формуючого фільтра та моделі дискретної вимірювальної системи. У якості апіорних даних можна використовувати результати поточних розрахунків, проведених у цьому підрозділі.

#### Синтез оптимального фільтра для обробки потоку первинних вимірювань кута місця ПС на основі методу Калмана

За умови повноти апіорної інформації найкращий шлях розв'язання задачі синтезу полягає у знаходженні апостеріорної густини розподілу ймовірностей параметрів, які підлягають фільтрації [10]. Така методика покладена у основу байесового підходу. Знання апостеріорної густини розподілу параметрів, що фільтруються, дозволяє легко визначати їх статистичні оцінки, оптимальні у певному розумінні, наприклад, за мінімальним значенням середньоквадратичної похибки фільтрації. Припустимо, що динамічні властивості фільтрованого параметру – кута місця ПС описуються різницеvim рівнянням (3), а первинні вимірювання кута місця утворюються у відповідності до рівняння (4). За умови гаусової статистики збурень динамічної моделі та шумів за умови повноти апіорної інформації найкращий шлях розв'язання задачі синтезу полягає у знаходженні апостеріорної густини розподілу ймовірностей параметрів, які підлягають фільтрації [10]. Така методика покладена у основу байесового підходу. Знання апостеріорної густини розподілу параметрів, що фільтруються, дозволяє легко визначати їх статистичні оцінки, оптимальні у певному розумінні, наприклад, за мінімальним значенням середньоквадратичної похибки фільтрації. Припустимо, що динамічні властивості фільтрованого параметру – кута місця ПС описуються різницеvim рівнянням (3), а первинні вимірювання кута місця утворюються у відповідності до рівняння (4). За умови гаусової статистики збурень динамічної моделі та шумів вимірювань оптимальна оцінка вектора стану за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки може бути отримана у рекурентній формі на основі поточного  $(k+1)$ -го вимірювання та величини оцінки з попереднього  $k$ -го такту. Дійсно, використовуючи байесів підхід неважко показати [6], що оптимальна оцінка, яка мінімізує байесів ризик являє собою умовне середнє значення

$$\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1) = \mathbb{E}\{\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^{k+1}\} = \int \mathbf{x}(k+1) \mathbf{f}[\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^{k+1}] d\mathbf{x}(k+1) \cos^{-1} \theta,$$

де  $\mathbf{f}[\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^{k+1}]$  – апостеріорна густина розподілу ймовірностей фільтрованого параметру – кута місця  $\mathbf{Y}_1^{k+1} = \{y(1), y(2), \dots, y(k+1)\}$  – вектор результатів радіовимірювань кута місця повітряного судна. Беручи до уваги правило Байєса, апостеріорну густину розподілу запишемо у такій формі:

$$\mathbf{f}[\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^{k+1}] = \frac{\mathbf{f}[\mathbf{y}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k, \mathbf{x}(k+1)] \mathbf{f}[\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k]}{\mathbf{f}[\mathbf{y}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k]}. \quad (6)$$

Оскільки дискретні випадкові процеси (5) є процесами Маркова, а густини розподілу, які входять до правої частини (6) вважаються гаусовими і з відповідними параметрами:

$$\mathbf{f}[\mathbf{x}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k] = \mathbf{N}[\mathbf{x}_0^*(k+1/k); \mathbf{P}(k+1/k)];$$

$$\mathbf{f}[\mathbf{y}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k, \mathbf{x}(k+1)] = \mathbf{N}[\mathbf{C}(k+1)\mathbf{x}(k+1); \mathbf{R}(k+1)];$$

$$\mathbf{f}[\mathbf{y}(k+1)/\mathbf{Y}_1^k] = \mathbf{N}[\mathbf{C}(k+1)\mathbf{x}_0^*(k+1/k); \mathbf{C}(k+1)\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1)];$$

де  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}_0^*(k/k)$  – екстрапольована оцінка, яка отримана з попереднього такту роботи пристрою оцінювання;  $\mathbf{N}(a, b)$  – нормальна густина розподілу ймовірностей з параметрами  $\mathbf{a}$  та  $\mathbf{b}$ ;  $\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{P}(k/k)\mathbf{A}^T(k+1, k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{B}^T(k+1, k)$  – кореляційна матриця похибок екстраполяції.

Процедура обчислення параметрів апостеріорного розподілу, які є по суті оптимальними поточними оцінками  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1)$  кута місця ПС та їх точності  $\mathbf{P}(k+1/k+1)$ , складається з перемноження вищенаведених нормальних густин розподілу та виділення у результуючому добутку матричного повного квадрата [9]. Опускаючи прості, але досить громіздкі проміжні перетворення, отримуємо систему рекурентних різницеvim рівнянь, які описують оптимальну за Калманом процедуру фільтрації потоку первинних радіовимірювань кута місця повітряного судна

$$\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}_0^*(k/k) + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}_0^*(k/k)]; \quad (7)$$



$$\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1,k) \mathbf{P}(k/k) \mathbf{A}^T(k+1,k) + \mathbf{B}(k+1,k) \mathbf{Q}(k) \mathbf{B}^T(k+1,k); \quad (8)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k/k+1) \mathbf{C}^T(k+1) [\mathbf{C}(k+1) \mathbf{P}(k/k+1) \mathbf{C}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1)]^{-1}; \quad (9)$$

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = \text{Cov}\{\mathbf{x}(k+1) / \mathbf{Y}_1^{k+1}\} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{C}(k+1)] \mathbf{P}(k+1/k). \quad (10)$$

Щодо виразів (7)–(10), то вони потребують додаткових коментарів:

1. Рівняння (7) описує рекурентний механізм формування поточної оцінки  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1)$  кута місця ПС і тим самим визначає структуру пристрою обробки потоку первинних вимірювань. Вона зображена на рис.3. До складу входять оптимальний матричний екстраполятор, оптимальний матричний дискримінатор та блок обчислень матричного коефіцієнта передачі. Оптимальний матричний екстраполятор має дві складові частини. Перша частина екстраполятора для обчислення екстрапольованої оцінки  $\mathbf{A}(k+1,k) \mathbf{x}_0^*(k/k)$  використовує математичну модель динамічного процесу (3), який описує зміну у часі кута місця ПС при виконанні посадочного маневру. Друга частина екстраполятора використовує інформаційну модель радіовимірювального тракту і на її виході формується прогнозоване значення результату вимірювань кута місця ПС  $\mathbf{y}^*(k+1/k)$ .

2. Якість роботи першої частини екстраполятора визначається виразом (8). Діагональні елементи кореляційної матриці  $\mathbf{P}(k+1/k)$  являють собою дисперсії похибок екстраполяції компонент вектора стану  $\mathbf{x}(k)$  на  $k+1$ -й момент часу. Якість роботи другої частини екстраполятора визначається виразом  $\mathbf{P}[\mathbf{y}(k+1/k)] = \mathbf{C}(k+1) \mathbf{P}(k+1/k) \mathbf{C}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1)$  [25], а діагональні елементи кореляційної матриці  $\mathbf{P}[\mathbf{y}(k+1/k)]$  визначають точність прогнозування результату радіовимірювань  $\mathbf{y}(k)$  на  $k+1$ -й момент часу.

3. Рівняння (9) визначає рекурентну процедуру обчислення матричного коефіцієнта фільтра Калмана, який безпосередньо залежить від точності екстрапольованої оцінки  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k)$ .

4. Рекурентне рівняння для кореляційної матриці похибок фільтрації (10) характеризує поточну точність оптимального пристрою обробки результатів радіовимірювань кута місця ПС.

5. У сучасних радіонавігаційних системах обробка інформації в пілотажно-навігаційних комплексах та системах керування польотом зазвичай виконується за допомогою бортового обчислювального комплексу, побудованого на основі системи мікро-ЕОМ, поєднаних у мережу [10]. У зв'язку з цим рекурентна форма рівнянь оптимальної дискретної фільтрації (7)–(10) якнайкраще відповідає потребам цифрової обробки радіосигналів і може бути успішно реалізована на практиці у вигляді комплексу відповідних програм. Процедура фільтрації починає працювати з введення апріорних даних  $\mathbf{x}(0/0)$  та  $\mathbf{P}(0/0)$  і виконується у чотири такти у такій послідовності :

$$\mathbf{P}(k+1/k) \rightarrow \mathbf{K}(k+1) \rightarrow \mathbf{P}(k+1/k+1) \rightarrow \mathbf{x}_0^*(k+1/k+1).$$

Не зайве ще раз наголосити, що згідно рис. 3 до складу оптимального фільтра входить апріорно задана модель руху ПС, яка виконує функцію прогнозу та корегувальна ланка зворотного зв'язку, причому у модель у якості збурення вводиться зважена нев'язка. Це дозволяє розглядати фільтр Калмана не тільки як обчислювач

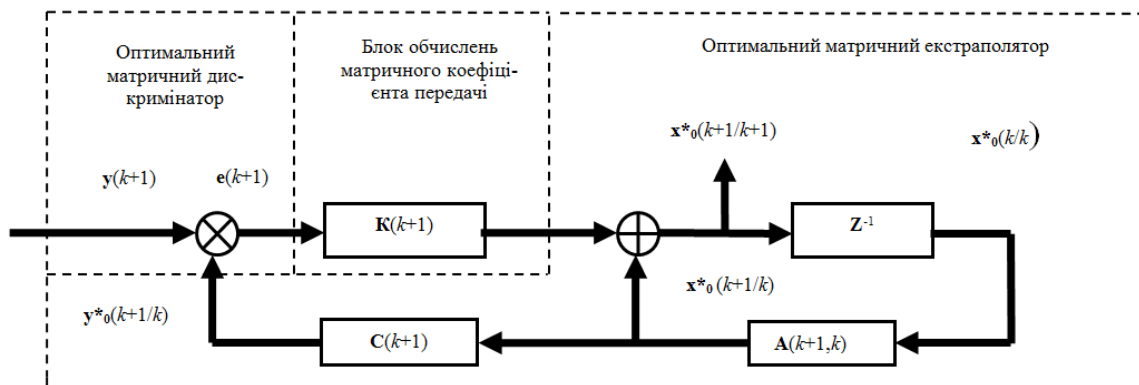


Рис. 3. Оптимальна за Калманом структура пристрою обробки потоку первинних радіовимірювань кута місця ПС

Не зайве ще раз наголосити, що згідно рис. 3 до складу оптимального фільтра входить апріорно задана модель руху ПС, яка виконує функцію прогнозу та корегувальна ланка зворотного зв'язку, причому у модель у якості збурення вводиться зважена нев'язка. Це дозволяє розглядати фільтр Калмана не тільки як обчислювальний алгоритм, а як пристрій стеження цифрового типу, що забезпечує мінімально можливу середньоквадратичну похибку як у перехідному, так і в усталеному режимах.

**Аналіз ефективності оптимального фільтра за критерієм «точність – об'єм обчислювальних ресурсів».** Методика виконання обчислювального експерименту. У процесі реалізації оптимального фільтра

за методом Калмана одним з найважливіших етапів є забезпечення його стійкості, тобто досягнення усталених значень похибок фільтрації. Основними чинниками відхилення реальних похибок фільтра від їх розрахованих значень можуть бути: відмінність запропонованих математичних моделей досліджуваних процесів від реально діючих; неадекватне встановлення початкових даних; неточності, допущені у апріорних даних щодо статистичних характеристик діючих збурень та шумів; похибки обчислювального характеру, що пов'язані з обмеженнями розрядної сітки та тощо. У низці випадків вказані фактори призводять до розбіжності результатів фільтрації порівняно з фактичними змінами інформаційних параметрів кутових сигналів у посадковій системі. У тому разі, коли оптимальний фільтр реалізується у вигляді спеціалізованого обчислювального пристрою з використанням мікро – ЕОМ, то постає задача вибору її типу ще на етапі технічного проектування. При цьому необхідно урахувати окрім апаратних та програмних затрат ще й особливості методу обробки посадкових даних, архітектуру системи посадки та надмірності, закладені у стандарті формату радіосигналу. Дослідження що виконуються у даному підрозділі мають за мету:

- дати кількісну оцінку точності та достовірності результатів, отриманих за допомогою фільтра Калмана;
- провести аналіз витрат лічильного часу та об'єму пам'яті, необхідних для практичної реалізації алгоритму фільтрації та на основі проведеного аналізу виробити рекомендації щодо вибору найбільш прийнятної структури пристрою обробки за умови регламентованої точності та практичних зручностей.

У основу методології даних досліджень покладено метод цифрового статистичного моделювання. Можливість прорахунків різних варіантів однієї і тієї ж задачі шляхом зміни початкових умов без реконструкції математичної моделі пристрою обробки зближує метод цифрового статистичного моделювання з натурним фізичним експериментом. Однією з переваг такого моделювання є те, що його можна використовувати на більш ранніх етапах технічного проектування, коли ще не усі лабораторні макети у наявності. Статистичне моделювання роботи оптимального фільтра Калмана виконувалось для ділянки горизонтального польоту з використанням математичних моделі (5). Для номінальних умов польоту точність первинних вимірювань визначалась кореляційною матрицею  $E\{\mathbf{n}(k+1)\mathbf{n}(k+1)^T\} = \mathbf{R}(k+1) = 0,0036$ . Необхідні шумові послідовності  $\mathbf{w}(k), \mathbf{n}(k)$  було отримано за

допомогою датчиків випадкових чисел, розподілених за нормальним законом розподілу з нульовими середніми значеннями та заданими кореляційними матрицями  $\mathbf{Q}(k) = 0,0001, \mathbf{R}(k+1) = 0,0036$ . Початкове значення вектора стану  $\mathbf{x}(0)$  у кожній реалізації приймалось випадковим, у той час як початкова оцінка  $\mathbf{x}^*(0/0)$  кута місця ПС оставалась незмінною на протязі усього експерименту. Оцінка ефективності роботи оптимального фільтра виконувалась шляхом порівняння відповідних статистичних характеристик точності з характеристиками точності розрахованими за формулою (10). Вищезгадані статистичні характеристики обчислювались на основі багаторазової імітації роботи досліджуваного пристрою, а потім імовірнісне усереднення за множиною замінялось обчисленням середньоарифметичних значень за формулами:

$$E\{[\Delta\mathbf{x}(k) - \overline{\Delta\mathbf{x}(k)}][\Delta\mathbf{x}(k) - \overline{\Delta\mathbf{x}(k)}]^T\} \approx \overline{\{\Delta\mathbf{x}(k)\}^2} - [\overline{\Delta\mathbf{x}(k)}]^2 \quad E\{\Delta\mathbf{x}(k)\} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\mathbf{x}_i^*(k/k) - \mathbf{x}_i(k)] = \overline{\{\Delta\mathbf{x}(k)\}};$$

$$E\{\Delta\mathbf{x}(k) \Delta\mathbf{x}(k)^T\} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{[\mathbf{x}_i^*(k/k) - \mathbf{x}_i(k)][\mathbf{x}_i^*(k/k) - \mathbf{x}_i(k)]^T\} = \overline{\{\Delta\mathbf{x}^2(k)\}}$$

Контроль результатів статистичного моделювання оцінювався двома параметрами: достовірністю отриманих оцінок  $\eta$  та шириною довірчого інтервалу  $\Delta$ . При проведенні статистичних експериментів достовірність оцінювання прийнято задавати зі стандартного ряду 0.9, 0.95, 0.99, 0.999. Тоді величину довірчого інтервалу можна розрахувати за формулою

$$\left[ \mathbf{P}^*(k/k)^{1/2} \right] (1 - \Delta) < \left[ \mathbf{P}(k/k)^{1/2} \right] (1 + \Delta),$$

де  $\mathbf{P}^*(k/k)^{1/2}, \mathbf{P}(k/k)^{1/2}$  – вибіркове та генеральне середньоквадратичне значення, відповідно;  $\Delta$  – ширина довірчого інтервалу, яка залежить від об'єму вибірки  $N$  і достовірності  $\eta$ ; для потреб практичних обчислень використовувались табульовані значення функції  $\Delta = \varphi(\eta, N)$  [10]. За умови апріорно заданих величин  $\eta$  і  $\Delta$  за допомогою табл. 4 [10] можна знайти об'єм вибірки, який гарантує задану достовірність. Наприклад, при  $\eta = 0.95$  і  $\Delta = 20\%$ , необхідний об'єм вибірки  $N$  становить не менше 50. Для подальшого моделювання прийемо  $N = 50$ . Це означатиме, що при даному об'ємі вибірки довірчий інтервал шириною  $2\Delta$  накріє теоретичне значення середньоквадратичної похибки оцінювання (генеральне середньоквадратичне) з ймовірністю 0.95. У якості апріорних даних були взяті результати наведені у табл. 1, притаманні вимірюванням, що виконуються у СП сантиметрового діапазону. У відповідності до виразів (7)–(10) на рис. 4 відображені результати статистичного моделювання, які підтверджують коректність роботи датчиків випадкових чисел, правильність розрахунків довірчого інтервалу та достовірність отриманих статистичних даних. Дійсно співставлення результатів рекурентних обчислень за формулою (10) та їх статистичного аналога, отриманого методом Монте-Карло показує, що довірчий інтервал у вигляді смуги

шириною  $\pm 20\%$  від теоретичного значення  $P_{11}(k/k)$  покриває теоретичну криву з імовірністю близькою до 0.95. Це дозволяє упевнитись у працездатності запропонованої методики.

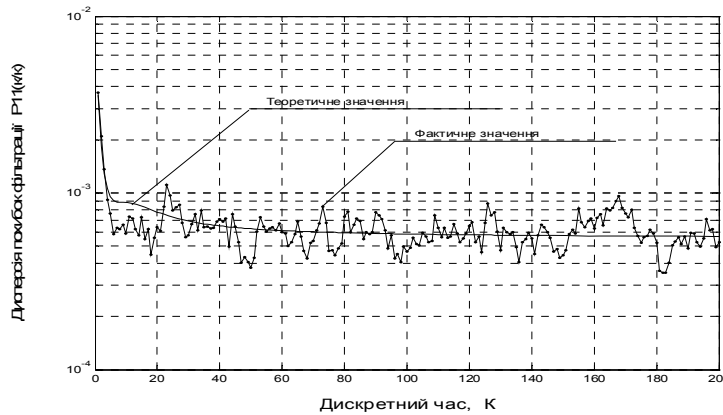


Рис. 4. Результат моделювання точності оцінювання кута місця ПС за методом Монте-Карло

На рис. 5 представлені результати фільтрації потоку первинних спостережень кута місця ПС для ділянки горизонтального польоту. Оскільки фільтр Калмана є системою з параметрами, які змінюються у часі, то матриця передачі оптимального фільтра перераховувалась на кожному кроці у відповідності з рекурентним рівнянням (9).

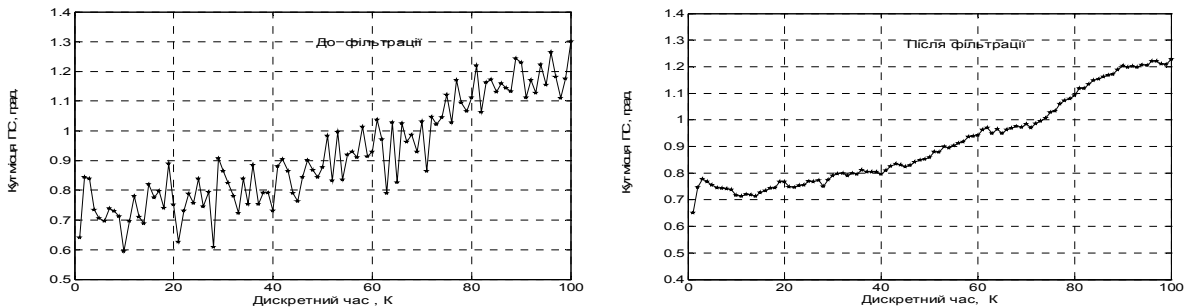


Рис. 5. Результати фільтрації потоку первинних вимірювань кута місця ПС

**Оцінка обчислювальних ресурсів.** Аналіз літературних джерел [7, 11, 12] показує, що оптимальний фільтр Калмана допускає декілька варіантів технічної реалізації у вигляді певної обчислювальної структури.

1. Структура за першим варіантом є традиційною. Оптимальний фільтр реалізується у рекурентній формі і у повному обсязі, вимагає помірних обчислювальних витрат з точки зору числа елементарних операцій додавання та множення з плаваючою крапкою. Проте, у пам'яті необхідно зберігати системні матриці  $A(k+1,k)$ ,  $B(k+1,k)$ ,  $C(k)$ ,  $Q(k)$ ,  $R(k)$  для усіх  $k=0,1$ . Також у оперативній пам'яті повинні зберігатися результати поточних обчислень оцінок  $x^*(k/k)$ ,  $P(k/k)$  з попереднього такту.

$$x_0^*(k+1/k) = A(k+1,k)x_0^*(k/k); \tag{11}$$

$$x_0^*(k+1/k+1) = x_0^*(k+1/k) + K(k+1)[y(k) - C(k)x_0^*(k+1/k)]; \tag{12}$$

$$P(k+1/k) = A(k+1,k)P(k/k)A^T(k+1,k) + B(k)Q(k)B^T(k); \tag{13}$$

$$K(k+1) = P(k+1/k)C^T(k)[C(k)P(k+1/k)C^T(k) + R(k)]^{-1}; \tag{14}$$

$$P(k+1/k+1) = [I - K(k+1)C(k)]P(k+1/k). \tag{15}$$

2. У цьому варіанті передбачається, що матриця передачі фільтра може бути довільною, її значення обчислюються заздалегідь для усіх  $k=0,1$  з яких-небудь інших міркувань і заносяться у постійну пам'ять. Таким чином рівняння (14) анулюється. Якщо фільтр залишається стійким, то перестав бути оптимальним, проте коваріаційну матрицю похибок фільтрації можна розраховувати за формулою (19). Форма рівнянь (16)–(19) описує якісні показники оцінювання для довільного лінійного фільтра.

$$x_0^*(k+1/k) = A(k+1,k)x_0^*(k/k); \tag{16}$$

$$x_0^*(k+1/k+1) = x_0^*(k+1/k) + K(k+1)[y(k) - C(k)x_0^*(k+1/k)]; \tag{17}$$

$$P(k+1/k) = A(k+1,k)P(k/k)A^T(k+1,k) + B(k)Q(k)B^T(k); \tag{18}$$

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k)[\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]^T + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{R}(k+1)\mathbf{K}^T(k+1). \quad (19)$$

3. Форма реалізації оптимального фільтра Калмана, яка виражається сукупністю рівнянь (20)–(23) не дає будь-яких обчислювальних переваг порівняно з попередніми варіантами. Її головним недоліком є те, що матрицю передачі оптимального фільтра фактично доводиться обчислювати двічі, один раз при обчисленні коваріаційної матриці похибок фільтрації  $\mathbf{P}(k+1/k+1)$  у рівнянні (22) і другий раз при обчисленні за формулою (21). Проте з іншої сторони, коли виконується аналіз лише якісних показників процесу фільтрації, безвідносно поведінки матриці передачі оптимального фільтра, то є можливість позмінно використовувати рівняння (22)–(23) для отримання матриць  $\mathbf{P}(k+1/k+1)$  та  $\mathbf{P}(k+1/k)$  для  $k = 0, 1$ . Нарешті, якщо досліджується поведінка лише однієї коваріаційної матриці похибок фільтрації, то можливе додаткове спрощення за рахунок підстановки виразу (23) у рівняння (22). Результатом такої операції буде матричне співвідношення першого порядку між матрицями  $\mathbf{P}(k+1/k+1)$  та  $\mathbf{P}(k+1/k)$ , що надзвичайно зручно при теоретичних дослідженнях. Доцільно ще раз наголосити, що в обчислювальному сенсі ця форма представлення алгоритму роботи оптимального фільтра малоприваблива, оскільки потребує трьох найбільш трудомістких операцій – обернення матриць розміру  $(n \times n)$ .

$$\mathbf{x}_0^*(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}_0^*(k/k); \quad (20)$$

$$\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1) = \mathbf{x}_0^*(k+1/k) + \mathbf{P}(k+1/k+1)\mathbf{C}^T(k+1)\mathbf{R}^{-1}(k+1)[\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\mathbf{x}_0^*(k+1/k)]; \quad (21)$$

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{P}^{-1}(k+1/k) + \mathbf{C}^T(k+1)\mathbf{R}^{-1}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]^{-1}; \quad (22)$$

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{P}(k/k)\mathbf{A}^T(k+1) + \mathbf{B}(k+1)\mathbf{Q}(k)\mathbf{B}^T(k+1). \quad (23)$$

4. Остання форма рівнянь оптимального фільтра являє собою гранично спрощену – укорочену форму реалізації фільтра Калмана за методом прямого програмування і реалізує, по-суті, систему стеження розімкненого типу:  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}_0^*(k/k)$ ;  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1) = \mathbf{x}_0^*(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{C}(k)\mathbf{x}_0^*(k+1/k)]$ .

Тут матриця передачі  $\mathbf{K}(k)$  обчислюється лише на основі апріорних даних для усіх  $k = 0, 1, \dots$ , а її значення разом з матрицями  $\mathbf{A}(k+1, k)$ ,  $\mathbf{C}(k+1)$  заносяться у постійну пам'ять. У оперативній пам'яті залишається лише оцінка  $\mathbf{x}_0^*(k+1/k)$ . Робота схеми фільтрації може бути ефективною за умови наявності високоякісної моделі динамічного процесу та незмінності умов експлуатації. У противному разі збіжність оцінок не гарантується. Таким чином, з практичної точки зору, найбільш прийнятними варіантами залишаються варіанти за номерами 1 та 4. Для них виконаємо оцінку обчислювальної ефективності. За міру складності практичної реалізації схеми фільтрації приймемо число необхідних арифметичних операцій множення та додавання двох чисел з плаваючою комою. При цьому передбачається, що розмірність динамічної системи –  $n$ , а каналу спостережень –  $m$  апріорно відомі.

$$K_M = \frac{M_1(n, m) - M_4(n, m)}{M_1(n, m)} 100\% = \frac{3n^3 + 2n^2 + 2nm^2 + m^3}{3n^3 + 2n^2 + 2nm^2 + m^3 + n^2 + 2nm} 100\%; \quad (24)$$

$$K_S = \frac{S_1(n, m) - S_4(n, m)}{S_1(n, m)} 100\% = \frac{3n^3 + 2n^2(m-1) + m^3 + 2nm(m-1)}{3n^3 + 2n^2m + 2nm^2 + m^3 - n^2 - n} 100\%. \quad (25)$$

Аналізуючи результати розрахунків неважко помітити, що варіант за номером 4 здатен забезпечити значну економію обчислювальних ресурсів, але за рахунок втрати гарантії збіжності отриманих оцінок через схильність до накопичення першо-початкових похибок, обумовлених неточністю математичної моделі та недостовірністю апріорних даних відносно статистичних характеристик діючих збурень та шумів. Наприклад, для фільтрів кутомірного каналу, що розглядалися у попередньому підрозділі при  $n = 2$ ,  $m = 1$ , ця економія, згідно з (24), (25), досягала величин  $K_M = 82\%$  і  $K_S = 80\%$  відповідно. Проте слід зауважити, що у деяких випадках за наявності жорстких обмежень на час обробки результатів спостережень та високоякісної динамічної моделі, вказана заміна може бути цілком прийнятною.

#### Висновки

1. На основі результатів виконаних досліджень можна стверджувати, що використання надмірності апаратних та програмних засобів разом з надзвичайно високою тактовою частотою сучасних мікропроцесорних пристроїв є перспективним напрямком підвищення точності, контролю достовірності та цілісності посадкових даних у процесі їх спеціальної обробки на шляху побудови високонадійної радіотехнічної системи посадки сантиметрового діапазону на перспективу після 2000 року. Загально визнаним методом вирішення таких проблем є використання фільтрів Калмана. Ефективне застосування методів оптимальної фільтрації передбачає повноту апріорної інформації про стан кутомірного каналу, статистичних характеристик діючих збурень та завад, математичну модель динаміки зміни у часі кутових координат ПС у процесі виконання посадкового маневру. Саме така задача розв'язувалась у даній роботі.

2. Розроблена удосконалена математична модель динамічного процесу зміни кута місця ПС у часі, яка на відміну від відомих результатів враховує не тільки тактико-технічні характеристики ПС, а також особливості режиму польоту на окремих ділянках посадкової траєкторії.

3. З метою підвищення швидкодії процесу фільтрації та спрощення його структури запропоновано декілька варіантів технічної реалізації оптимального фільтра Калмана. За результатами порівняльного аналізу визначено два найкращих варіанти. Дана оцінка їх точності та обчислювальної ефективності. Адекватність проведених розрахунків підтверджена шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло.

### Література

1. Новожилов Г. В. Безопасность полета самолета. Концепция и технология / Новожилов Г.В. – М. : Машиностроение, 2003. – 144 с.
2. Пергл Г. Императив безопасности в воздухе. Тематический выпуск –75 лет гражданской авиации / Г. Пергл // Америка. – 1978. – № 265. – 117 с.
3. Семенов А.А. Радионавигационные системы аэропортов. Радиомаячные системы посадки / А.А. Семенов, В.Г. Мелкунин. – К. : КМУГА, 1999. – 100 с.
4. Кичак В.М. Методи та пристрої обробки радіосигналів бортових авіаційних систем посадки : монографія / В.М. Кичак, Ю.М. Воловик, А.Ю. Воловик. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 208 с.
5. Воловик А.Ю. Оцінювання характеристик функціональної надійності фазового каналу синхронізації в системі посадки сантиметрового діапазону / А. Ю. Воловик, Ю. М. Воловик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 151–154.
6. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс ; пер. с англ. ; под ред. Б. Р. Левина. – М. : Связь, 1976. – 496 с.
7. Жуков А. Я. Динамика полета транспортных летательных аппаратов / Жуков А. Я. – М. : Транспорт, 1996. – 326 с.
8. Калачев Г.С. Самолет легчик и безопасность полета / Калачев Г.С. – М. : Машиностроение, 1979. – 222 с.
9. Baranowski J. Bayesian fault detection and isolation using Field Kalman Filter / J. Baranowski, P. Bania, I. Prasad, T. Cong // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2017. – P. 52–63.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1977. – 479 с.
11. Федоров С.М. Бортовые информационно – управляющие системы / Федоров С. М. – М. : Транспорт, 1994. – 294 с.
12. Гуров И.П. Анализ и оптимизация вычислительного процесса нелинейной дискретной фильтрации Калмана / И. П. Гуров, А. С.Захаров, М. А. Таратин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – № 8. – С. 42–48.

### References

1. Novozhilov G. V. Bezopasnost poleta samoleta. Kontsepsiya i tehnologiya / Novozhilov G.V. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 144 s.
2. Pergl G. Imperativ bezopasnosti v vozduhe. Tematicheskij vyipusk –75 let grazhdanskoy aviatsii / Pergl G. // Amerika. – 1978. – 265. – 117 s.
3. Semenov A.A. Radionavigatsionnyie sistemy aeroportov. Radiomayachnyie sistemyi posadki. / A.A. Semenov, V.G. Melkunin – K.: KMUGA, 1999. – 100 s.
4. Kychak V.M. Metody ta prystroji obrobky radiosyghnaliv bortovykh aviacijnykh system posadky : monoghrafija / V.M. Kychak, Ju.M. Volovyk, A.Ju. Volovyk. – Vinnycja: VNTU, 2011.–208 s.
5. Volovyk A.Ju. Ocinjuvannja kharakterystyk funkcionalnoji nadijnosti fazovogho kanalu synkhronizaciji v systemi posadky santymetrovogho diapazonu / A. Ju. Volovyk, Ju. M. Volovyk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2007. – Issue 1. – S.151 – 154.
6. Seydzh E. Teoriya otsenivaniya i ee primenenie v svyazi i upravlenii / E. Seydzh, Dzh. Mels.; per. s angl.; pod red. B. R. Levina. – M. : Svyaz, 1976. – 496 s.
7. Zhukov A. Ya. Dinamika poleta transportnyih letatelnyih apparatov / Zhukov A. Ya. – M.: Transport, 1996. – 326 s.
8. Kalachev G.S. Samolet letchik i bezopasnost poleta / Kalachev G.S.– M.:Mashinostroenie, 1979.–222 s.
9. Baranowski J. Bayesian fault detection and isolation using Field Kalman Filter / J. Baranowski, P. Bania, I. Prasad, T. Cong // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing.– 2017.–P. 52–63.
10. Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statisika / V.E Gmurman – M.: Vyisshaya shkola, 1977. – 479 s.
11. Fedorov S.M. Bortovye informatsionno – upravlyayuschie sistemyi / Fedorov S. M. – M.: Transport, 1994. – 294 s.
12. Gurov I.P. Analiz i optimizatsiya vyichislitel'nogo protsessha nelineynoy diskretnoy filtratsii Kalmana / I. P. Gurov, A. S.Zaharov, M.A. Taratin // Izv. vuzov. Priborostroenie.–2004, 8.– S. 42 – 48.

Рецензія/Peer review : 3.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ. МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ  
ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ  
И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО  
ЧАСТЬ 4. МАГНИТОПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

*В работе рассмотрена сущность и приведено несколько определений нового принципа измерений, положенного в основу магнитопольевых методов измерений. Дано определение, сформулированы цели магнитопольевых измерений. Описаны этапы магнитопольевых измерений, приведены функциональные схемы магнитопольевых измерительных преобразователей и подробно описаны их особенности и работа. Рассмотрены физические процессы взаимодействия импульсного магнитного поля с отрицательно заряженными квазичастицами материала, из которого выполнена механическая система замкнутого типа (двухконтурный волновод). Особое внимание уделено описанию действия магнитных и электрических сил на отрицательно заряженные квазичастицы. Показана возможность описания траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц посредством уравнения величин, которое впервые было выведено автором, а соответствующая кривая получила название «бикольцид». Показано, что под действием импульсного магнитного поля отрицательно заряженные квазичастицы движутся в параллельных между собой плоскостях в одном направлении. Магнитная и кулоновская силы не дают этим квазичастицам столкнуться, т.к. являются силами действия и противодействия. Установлено, что ток в волноводе может оставаться пропорциональным скорости электронов только при условии, что скорость периодически сбрасывается в нуль. В таком случае ток характеризуется длиной свободного пробега квазичастиц. Приведена базовая принципиальная схема магнитопольевого преобразователя и несколько его вариантов. Описаны особенности этих схем. Показаны возможности включения пассивных и активных сенсоров к первичному контуру магнитопольевого измерительного преобразователя. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольевые эффекты и явления, пути и методы создания сенсоров физических величин, а также изучающих магнитопольевые методы и средства измерения свойств и состава веществ и материалов с использованием нового принципа измерений — явления переноса энергии и информации сквозь материал.*

*Ключевые слова: новый физический принцип измерений, базовые схемы магнитопольевых измерительных преобразователей, бикольцид.*

V.T. KONDRATOV

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Science of Ukraine

**FUNDAMENTAL METROLOGY. THE MAGNETIC-FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE THE  
PHENOMENON OF TRANSFER OF ENERGY AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE  
PART 4. MAGNETIC-FIELD METHODS AND MEASURING CONVERTERS**

*In the paper the essence is considered and some definitions of a new principle of the measurements taken as a principle of magnetic-fields measurements methods are resulted. Definition is made, the purposes magnetic-fields measurements are formulated. Stages magnetic-fields measurements are described, is resulted functional schemes of magnetic-fields measuring converters and in detail described their features and work. Physical processes of interaction of a pulse magnetic field with negatively charged quasi-particles of material, from which executed the mechanical system of closed type (two-path waveguide) are considered. The special attention is given the description of action of magnetic and electric forces on negatively charged quasi-particles. Possibility of the description of a trajectory of movement negatively charged quasi-particles by means of the quantities equation which has been deduced for the first time by the author is shown, and the corresponding curve has received the name «biringoid». It is shown that under the action of a pulsed magnetic field, negatively charged quasi-particles move in parallel planes in one direction. Magnetic and coulomb powers do not allow to these quasi-particles to face, since are forces of action and counteraction. It is established, that the current in a wave guide can remain proportional to speed electrons only provided that speed is periodically dumped in zero. In that case the current is characterized by length of free run of quasi-particles The base basic scheme of magnetic-field converter and some its variants is resulted. Features of these schemes are described. Possibilities of inclusion of passive and active sensor controls to a primary contour of magnetic-field measuring converter are shown. Work is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying the magnetic-field effects and the phenomena, ways and methods creation of sensor controls of physical sizes, and also studying a magnetic-field methods and gauges of properties and structure of substances and materials with use of a new principle of measurements — the phenomena of carrying over of energy and the information through a material.*

*Keywords: new physical principle of measurements, base schemes of magnetic-field measuring converters, biringoid.*

В предыдущей статье (см. [1]) была рассмотрена сущность явления переноса энергии и информации сквозь вещество и условия его осуществления. Описаны фундаментальные законы магнетизма и электродинамики, положенные в основу явления переноса энергии и информации. Установлено шесть основных требований к материалам, используемым для передачи энергии и информации. Было показано, что явление передачи энергии отрицательно заряженных квазичастиц сквозь материал описывается с использованием законов сохранения энергии электромагнитного поля и закона сохранения энергии

заряженных квазичастиц, движущихся по замкнутому контуру. Только благодаря закону сохранения механической энергии устанавливается связь между координатами и скоростями движения заряженных квазичастиц в двух симметрично расположенных точках траектории их движения по замкнутому контуру.

В целом сущность явления переноса энергии и информации сквозь материал (вещество), заключается в воздействии на материал, из которого выполнена механическая система замкнутого типа, соленоидальным импульсным магнитным полем высокой или сверхвысокой частоты, создании вихревого (индукционного) электрического поля, передаче энергии вихревого электрического поля в (кинетическую) энергию сложного (поперечно-продольного) движения конечной совокупности отрицательно заряженных квазичастиц, формировании токов переноса и смещения, создании этими токами соответствующего магнитного поля, порождении высокочастотной электромагнитной волны, передающей свою энергию и связанную с ней информацию вдоль замкнутого контура механической системы, наведении в неподвижном приемном контуре механической системы ЭДС электромагнитной индукции, содержащей полезную информацию, трансформации этой ЭДС в переменное напряжение заданного уровня, выпрямлении, фильтрации или усреднения его, выделения на нагрузке сигнала электрической природы (тока или напряжения), удобного для восприятия данных (информации), запоминания, обработки и передачи потребителю [1].

Явление переноса энергии и информации положено в основу физического принципа магнито-полевых измерений.

В данной работе основное внимание уделено рассмотрению сущности нового физического принципа измерений, сущности и особенностям магнито-полевых методов измерений.

Создание и развитие магнито-полевой теории измерений, как новейшего научного направления в общей теории измерений, обусловлено острой необходимостью измерений и исследований энергии Ферми новых материалов микро- и макромира, энергий дискретных энергетических уровней Ландау при изучении электрических и частотных свойств наноматериалов, биоматериалов, радиоматериалов и т.д., и т.п., а также разработки новых методов измерений свойств веществ и материалов на новом физическом принципе с целью решения существующих проблем фундаментальной метрологии и материаловедения.

Объектом исследований являются принципы и методы измерений физических величин.

Предметом исследований является новый принцип измерения физических величин, теоретические и практические аспекты магнито-полевых измерений.

Несомненно актуальной является проблема создание основ магнито-полевой теории измерений на основе нового физического принципа измерений — явления переноса энергии и информации сквозь проводящие или слабо проводящие среды (материалы и вещества) при воздействии на них энергией импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты, а также описание сущности магнито-полевых методов измерений и схемотехнических решений магнито-полевых измерительных преобразователей физических величин (ФВ) и средств измерений (СИ).

### **Результаты исследований**

#### ***Определение и цели магнито-полевой теории измерений***

Магнито-полевая теория измерений — это теория, опирающаяся на основные законы теории электромагнетизма и использующая новый принцип измерений, — явление передачи энергии и информации через материальную или вещественную среду.

В работе [1] нами приведено расширенное и лаконичное определение магнито-полевой теории измерений (МПТИ). Напомним их.

*Магнито-полевая теория измерений* — это: система законов сохранения и преобразования энергии, сохранения импульса, момента импульса, электрического заряда и массы; система категорий, принципов, методов, математических и структурных моделей; система определений, положений, условий и ограничений, представляющая новую стратегию измерений на основе явления переноса энергии и информации сквозь слабо проводящие и проводящие (материальные или вещественные) среды, предлагающая новые методы линейного и нелинейного измерительного преобразования величин разной физической природы.

Это достигается за счет взаимодействий энергии зондирующего магнитного поля и потенциальной энергии материала (вещества), за счет преобразования последней в кинетическую энергию волнового движения заряженных частиц внутри материала (вещества). Теория предсказывает достижимые результаты по качеству измерений.

*Магнито-полевая теория измерений* — это система научных знаний о закономерностях взаимодействия энергии электромагнитных полей с энергией отрицательно заряженных квазичастиц материалов, объединенная концепцией волнового подхода к переносу и преобразованию энергии и информации через материал, опирающаяся на новый физический принцип измерений, на определенную совокупность фундаментальных законов электромагнетизма, категорий, условий, научных принципов, методов и методологий.

Целями МПТИ (на начальном этапе развития) являются [1]:

1) измерение ФВ вещественной, энергетической и информационной групп с использованием явления переноса энергии и информации сквозь проводящие и слабо проводящие (материальные или вещественные) среды;

2) изучение частных (резонансных и волновых) проявлений явления перенос энергии и информации через проводящие и слабо проводящие среды при измерениях физических величин (ФВ) той или иной природы и при управляемых воздействиях импульсным магнитным полем заданной частоты и индукции на заряженные квазичастицы материала или вещества;

3) разработка магнитополевых способов управления параметрами и видом функции измерительного преобразования энергии информативных сигналов;

4) широкомасштабные исследования скрытой энергии Ферми и энергии дискретных энергетических уровней Ландау различных типов материалов и веществ;

5) исследование явления излучения антенной радиоимпульсов при переходе электронов с одного дискретного уровня Ландау на другой для исследуемых образцов (ИО) материалов и веществ;

6) исследование МП явлений и эффектов взаимодействия зондирующих импульсных магнитных полей с материалом и веществом и их проявлений в целях расширения функциональных возможностей данного физического принципа измерений с учетом и без учета действия полей иной физической природы;

7) разработка магнитополевых методов прямых и избыточных измерений величин разной физической природы;

8) разработка методов измерений физико-химических свойств проводящих и слабо проводящих материалов и веществ, в том числе жидких и газообразных;

9) создание новых методов и методологий формирования постоянных и переменных магнитных полей заданной конфигурации, широкого диапазона частот, стабильных по значению индукции и напряженности магнитного поля и с разными законами воздействия на ИО материала (вещества) в пространстве и во времени;

10) исследование существующих и разработка новых видов модуляции токов, магнитных полей и/или скорости движения заряженных квазичастиц, используемых при преобразованиях энергии одного вида в энергию другого;

11) исследования оптимальных способов выделения, фильтрации и защиты полезной информации от внешних неинформативных воздействий на квазичастицы ИО материала (вещества) иных полевых форм энергии;

12) изучение влияния добавок и инородных включений в ИО материала (вещества) на результат измерения энергий Ферми и Ландау;

13) разработка методов и методологии технического контроля качества овощей, фруктов и корнеплодов по таким информативным признакам, как «значение энергии Ферми на единицу объема», число и значение энергии дискретных уровней Ландау на единицу объема»;

14) медико-биологические исследования влияния циркуляции отрицательно заряженных квазичастиц на очаги воспаления органов и систем человека;

15) создание методологии построения магнитополевых измерительных преобразователей для прямых и избыточных измерений указанных энергий и других ФВ;

16) развитие в МП ТИ методов измерений свойств веществ и материалов, которым приписывается или не приписывается математическая модель;

17) исследование и разработка научных принципов, методологии и методов конструирования и построения базовых структур магнитополевых средств измерений (МП СИ), информационных измерительных систем (МП ИИС) и магнитополевых измерительных преобразователей (МП ИП);

18) создание базовых структур МП СИ, МП ИИС и МП ИП, в том числе и интеллектуальных, включающих базы знаний (БЗ), экспертные системы (ЭС) и/или интеллектуальные интерфейсы (ИНИ);

19) создание базовых структур информативно-избыточных сенсоров и биосенсоров, в том числе и интеллектуальных, на основе магнитополевых явлений переноса энергии и информации через вещество или материал;

20) разработка (совместно с материаловедами) государственных стандартов и принципов построения стандартных образцов (СО) состава и свойств веществ и материалов для МП СИ, ИИС и ИП;

21) разработка общих подходов и принципов системного и прикладного программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) МП СИ, МП ИИС и МП ИП;

22) разработка методологии, алгоритмов и методики тестирования МП СИ, МП ИИС и МП ИП;

23) разработка методов и методик самопроверки МП СИ, МП ИИС и МП ИП;

24) разработка методов калибровки МП СИ, МП ИИС и МП ИП, в том числе и интеллектуальных;

#### **Физический принцип магнитополевых измерений**

*Принцип измерений* — физическое явление (физический закон или эффект), положенное в основу измерений [2].

*Метод измерений* — прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Нами предложено несколько определений принципа магнитополевых измерений:

*Определение 1* (основное)

Принцип магнитополевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации отрицательно заряженными квазичастицами, движущимися под действием соленоидального магнитного поля по замкнутому контуру пассивной механической системы (волновода), выполненной из проводящего



или слабо проводящего материала.

#### *Определение 2*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации отрицательно заряженными квазичастицами, движущимися под действием магнитного поля с заданной скоростью по замкнутому контуру механической системы, выполненной из материала с известной подвижностью электронов.

#### *Определение 3*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса по замкнутому контуру пассивной механической системы энергии и информации токами переноса и смещения, созданными при воздействии импульсного магнитного поля высокой частоты на материал этой системы.

#### *Определение 4*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации движущимися с заданной скоростью отрицательно заряженными квазичастицами по контуру механической системы замкнутого типа, выполненной из проводящего или слабо проводящего материала.

#### *Определение 5*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации отрицательно заряженными квазичастицами, совершающими колебательно-поступательное движение по замкнутому контуру пассивной механической системы под действием импульсного магнитного поля высокой частоты.

#### *Определение 6*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации отрицательно заряженными квазичастицами, движущимися с установленной скоростью по замкнутому контуру пассивной механической системы под действием сил соленоидального магнитного поля.

#### *Определение 7*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации по замкнутому контуру консервативной механической системы движущимися электронами и другими отрицательно заряженными квазичастицами, силы взаимодействия между которыми являются консервативными (потенциальными) и практически отсутствуют взаимные превращения механической энергии в другие виды энергии.

#### *Определение 8*

Принцип магнитопольевых измерений — физическое явление переноса энергии и информации движущимися электронами и отрицательно заряженными квазичастицами по замкнутому контуру механической системы под действием нормированных по значению сторонних сил.

Приведенные определения физических принципов МП измерений расширяют наши представления о его сущности.

Строго говоря, все системы в природе являются диссипативными, т.е. рассеивающими энергию. В них закон сохранения механической энергии нарушается. Тем не менее, энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой. В этом состоит сущность количественной и качественной неуничтожимости материи и движения.

#### **Метод магнитопольевых измерений**

*Метод магнитопольевых измерений* — совокупность физических операций формирования тока высокой частоты и заданной формы, формирования соленоидального магнитного поля с заданными значениями частоты и индукции, модуляции тока высокой частоты, а, следовательно, и магнитного поля, по одному из параметров, магнитосилового воздействия им на материал механической системы замкнутого типа (источник электронов) с известной подвижностью электронов<sup>1</sup>, формирования в ней токов переноса и смещения, переноса энергии движущихся электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц и содержащей в ней информации в приемный контур, преобразования ее в ЭДС индукции Фарадея, трансформации полученной ЭДС в переменное напряжение заданного уровня с последующим выделением информативной низкочастотной составляющей.

Причем канал магнитопольевого измерительного преобразования физической величины априори калибруется при заданном стандартном образце (СО) материала механической системы. Сравнения измеряемой физической величины с ее единицей осуществляется в соответствии с реализованным принципом измерений по электрической величине — по постоянному току или напряжению.

#### **Этапы магнитопольевых измерений**

Измерение физической величины магнитопольевым методом включает в себя следующие этапы:

- 1) обоснование необходимости использования магнитопольевых измерений для той или иной ФВ;
- 2) изучение свойств измеряемой физической величины и возможностей преобразования ее в электрический сигнал: напряжение или ток различного (микро или макро) уровня;
- 3) изучение возможности изготовления из исследуемого материала волновода (механической системы замкнутого типа) и существования стандартных образцов этого материала при измерении энергии Ферми и/или Ландау;

<sup>1</sup> с известным или неизвестным числом свободных электронов или значением их подвижности.

4) выбор для СО материала с известными механическими и электрическими свойствами: с заданными значениями площади и толщины (объема), класса обработки поверхности, подвижности электронов и их числом в единице объема;

5) изготовление из выбранного материала СО пассивной механической системы замкнутого типа, удовлетворяющей априори заданным требованиям;

6) выбор образцового сенсора или СО материала для решения задачи калибровки по нему выходного сигнала магнитополевого измерительного преобразователя;

7) формирование периодической последовательности импульсов электрического тока высокой или сверхвысокой частоты типа «меандр» с априори заданным значением амплитуды и частоты;

8) модуляция одного из параметров импульсного тока сигналом, пропорциональным измеряемой ФВ;

9) формирование модулированной по значению индукции периодической последовательности «пачек» импульсов соленоидального магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты;

10) выбор значения и формирование низкой частоты коммутации в зависимости от частоты и фазы информативного сигнала, т.е. формирование неизменного значения частоты коммутации, в том числе при девиации частоты следования импульсов тока высокой или сверхвысокой частоты;

11) обеспечение условий для помехоустойчивого переноса энергии и информации по замкнутому контуру механической системы путем, например, магнитного экранирования колебательных контуров измерительного преобразователя от действия внешних магнитных полей с использованием экранов из ферромагнетиков, из магнитномягких кристаллических и аморфных сплавов с металлическим типом проводимости или из других материалов и сплавов;

12) формирование вихревого электрического поля путем воздействия на материал механической системы замкнутого типа силового соленоидального магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты, обеспечивающего движение отрицательно заряженные квазичастицы (свободные электроны) по данному контуру;

13) создание токов переноса и смещения, обусловленных движением свободных и связанных электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц в контуре механической системы;

14) формирование полным током механической системы вторичного импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты, порождающего вместе с вихревым электрическим полем соответствующей электромагнитной волны, переносящей энергию и информацию по замкнутому контуру механической системы;

15) наведение в неподвижном приемном колебательном контуре диаметрально расположенным относительно излучающего контура, Э.Д.С. индукции Фарадея, пропорциональной измеряемой ФВ;

16) трансформации (усиления) наведенной Э.Д.С индукции Фарадея в электрический сигнал с априори заданным значением коэффициента трансформации;

17) выпрямление полученного высокочастотного или сверхвысокочастотного электрического сигнала и выделение (фильтрация) информативной низкочастотной составляющей;

18) измерение полученного напряжения в течение времени, кратном полупериоду частоты коммутации;

19) усреднение результатов измерений за 1 – 10 (100) полупериодов низкой частоты коммутации;

20) запоминание окончательного результата измерений или преобразование его в форму, удобную для дальнейшего использования, например, для передачи полученной информации на расстояние.

Предложенная последовательность этапов (действий) по реализации процесса измерения ФВ магнитополем методом является базовой. При измерении конкретных ФВ возможны несущественные изменения и уточнения в выполняемых операциях. Таким образом, созданы все предпосылки по реализации МП методов измерений ФВ.

#### **Принципиальные схемы магнитополевых измерительных преобразователей [2, 3]**

На рис. 1, а, б приведены принципиальные схемы широкополосного (а) и избирательного (б) МП ИП, реализующие новый физический принцип измерений (преобразований) ФВ.

На рис. 1, а, б введены следующие обозначения:  $G_{\pm}$  — источник питания,  $G_0$  — генератор низкой частоты коммутации,  $ZQ$  — кварцевый резонатор,  $R1$  и  $R2$  — первый и второй токозадающие резисторы,  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  — первый и второй нагрузочные резисторы,  $C1$  и  $C2$  — времязадающие первый и второй конденсаторы,  $C3$  и  $C4$  — первый и второй конденсаторы колебательных контуров,  $VT1$  и  $VT2$  — первый и второй транзисторы,  $VD1$  и  $VD2$  — первый и второй полупроводниковые диоды,  $L1, \dots, L4$  — катушки индуктивностей (в частном случае равные между собой по значениям индуктивности:  $\{L1\} = \{L2\} = \{L3\} = \{L4\} = \{L_0\}$ ),  $DR$  — двухконтурный резонатор или волновод,  $AC1$  и  $AC2$  — первый и второй броневые ферритовые сердечники,  $C_H$  — конденсатор нагрузки,  $U_H$  — выходное напряжение на  $RC$ -нагрузке.

Приведенные принципиальные схемы представляют собой схемы кварцованных генераторов высокой частоты с индуктивной нагрузкой. Приведенные схемы в высокой степени симметричны относительно вертикальной оси. Схемотехнически они реализуются в виде симметричного высокочастотного генератора с частотоподающим кварцевым резонатором и симметричного мультивибратора, генерирующего сигнала

низкой частоты коммутации..

Приведенные принципиальные схемы представляют собой схемы кварцованных генераторов высокой частоты с индуктивной нагрузкой. Приведенные схемы в высокой степени симметричны относительно вертикальной оси. Схемотехнически они реализуются в виде симметричного высокочастотного генератора с частотодающим кварцевым резонатором и симметричного мультивибратора, генерирующего сигнала низкой частоты коммутации..

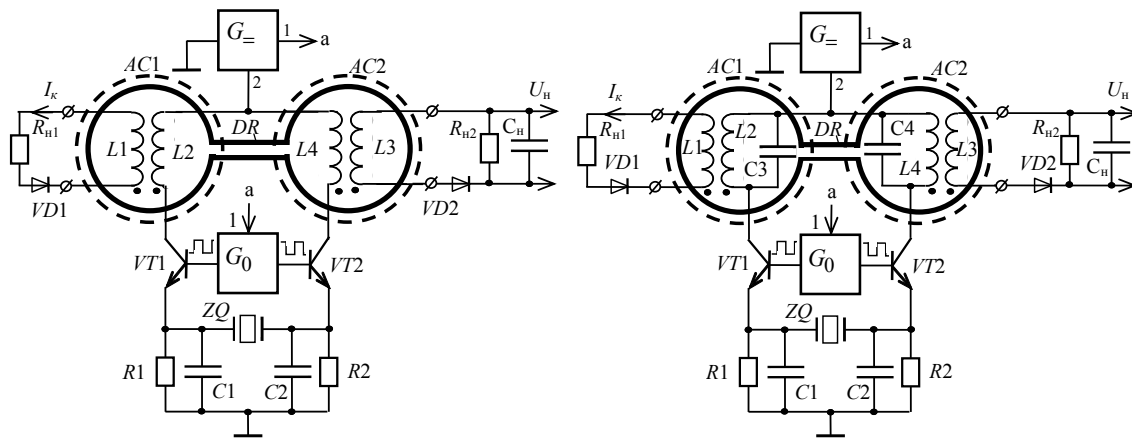


Рис. 1, а, б. Принципиальные схемы широкополосного (а) и избирательного (б) МП ИП

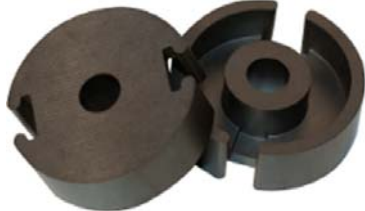


Рис. 2. Внешний вид бронзового ферритового сердечника

С целью повышения чувствительности преобразователя, одновитковые контура механической системы (двухконтурного резонатора или волновода) и каждая пара колебательных контуров генератора высокой частоты защищены от Все это позволило создать оптимальные условия для проявления фундаментальных законов взаимодействия магнитных полей и квазичастиц ИО материала и получить выходной сигнал  $U_H$  электрической природы, количественно описывающий результат взаимодействия магнитного поля с

конкретным материалом.

Измерительный преобразователь весьма прост в изготовлении. Он представляет собой генератор пачек высокочастотных импульсов тока типа меандр (см. рис. 3), следующих с частотой  $f_B = 1/T_B$  в течение интервала времени  $0,5T_H$ , т.е. периодически с априори заданной низкой частотой коммутации  $\Omega_0 = 1/T_H$ .

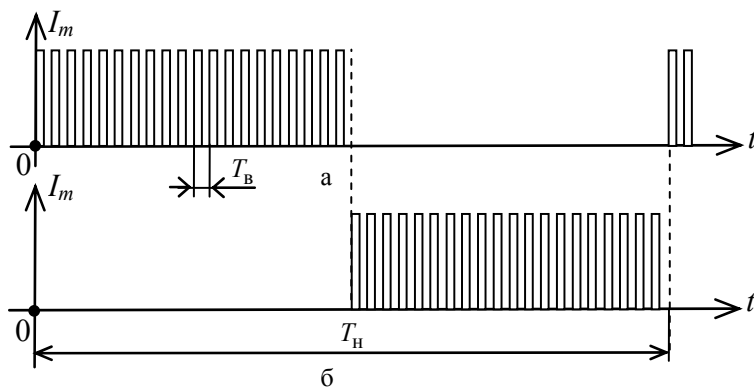


Рис. 3. Графическое изображение «пачек» высокочастотных импульсов тока (коллекторный ток транзисторов VT1 и VT2

В магнитополовом измерительном преобразователе в качестве коллекторной нагрузки используются идентичные колебательные контура с параметрами  $L_0C_0$  (где  $L_0$  индуктивность контура,  $C_0$  — собственная емкость контура). На коллекторах транзисторов VT1 и VT2 наблюдаются «пачки» высокочастотных колебаний, эпюры которых приведены на рис. 3, а, б, соответственно.

Высокочастотные колебания прямо-угольной формы сформированы путем усиления и ограничения по амплитуде автоколебаний кварцевого

резонатора ZQ, подключенного между эмиттерами транзисторов VT1 и VT2. Сами транзисторы нагружены на параллельно соединенные резистор и конденсатор, значения которых равны между собой, т.е.  $\{R1\}=\{R2\}=\{R0\}$  и  $\{C1\}=\{C2\}=\{C0\}$ .

Важным элементом измерительного преобразователя является механическая система замкнутого типа, выполненная из ИО материала (металла или диэлектрика) (см. рис. 1, элемент DR). На рис. 4 приведены чертежи пассивной механической системы, выполненной в виде плоского двухконтурного резонатора замкнутого типа. Такую систему можно назвать также волноводом. Она имеет два локальных (левый и правый) и один общий центры симметрии (см. рис. 4, точки  $O_L$ ,  $O_P$  и  $O_C$  соответственно). Приведенная конструкция механической системы позволяет правильно описать ряд свойств материалов (металлов и диэлектриков) и их изменений, связанных, например, с температурой.

Механическая система (рис. 4) является достаточно широкополосной волноводной системой с равномерной полосой пропускания от десятков до сотен мегагерц. В этой связи, и как показали исследования, конденсаторы высокочастотных колебательных контуров могут быть исключены. Это расширяет диапазон рабочих частот и повышает чувствительность измерительного преобразователя. Другой важной особенностью измерительного преобразователя является расположение первой и второй катушек индуктивности в центрах симметрии  $O_I$  и  $O_{II}$  механической системы строго перпендикулярно плоскости поверхности этой системы.

Третьей важной особенностью является использование двух броневых ферритовых сердечников для раздельного экранирования от действия внешних магнитных полей первой и второй катушек индуктивности и их высоко-частотных колебательных контуров, а также (левого и правого) одновитковых контуров механической системы (рис. 1, броневые сердечники  $AC1$  и  $AC2$ ).

Активные и пассивные сенсоры подключаются через входные разъемы к входному контуру  $L1$  первой катушки индуктивности измерительного преобразователя согласно принципиальным схемам, приведенным на рис. 5. При этом, конечной задачей является модуляция вектора индукции магнитного поля высокой частоты путем изменения тока через входную катушку индуктивности  $L1$ .

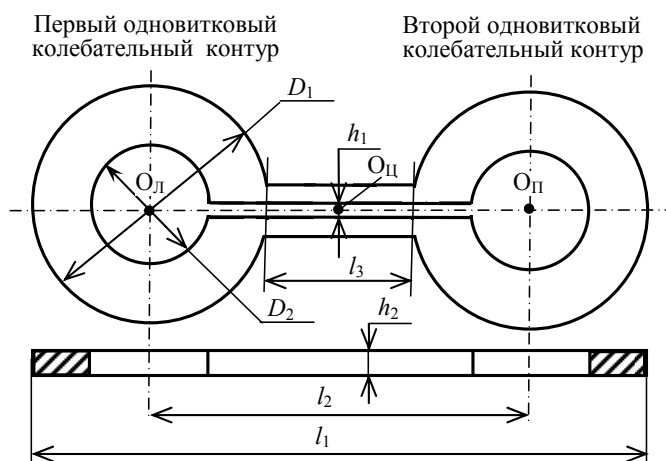


Рис. 4. Чертежи монолитной плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа

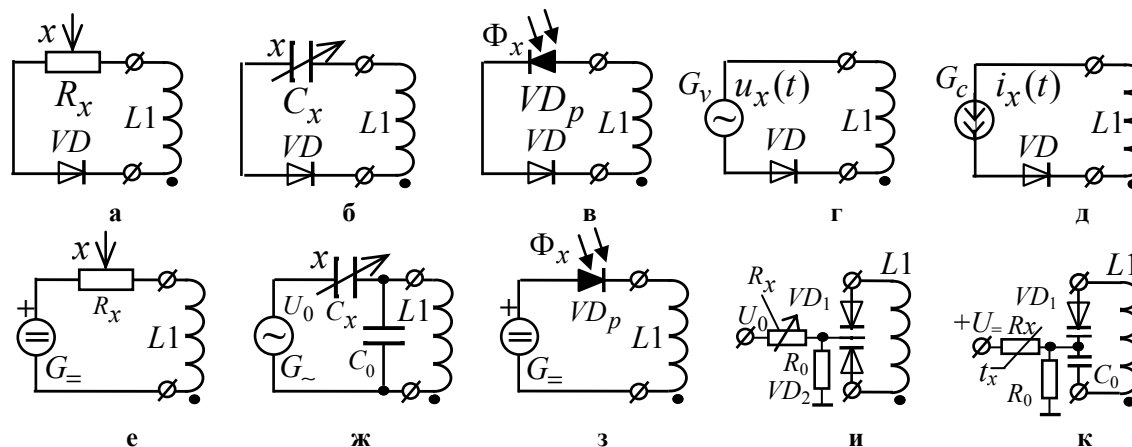


Рис. 5. Принципиальные схемы подключения пассивных и активных резистивных сенсоров (а) и (е), емкостных сенсоров (б) и (ж), фотодиодных (в) и (з), внешнего источника напряжения (г) или тока (д), с управляемыми варикапами (и) и (к) к первому пассивному колебательному контуру измерительного преобразователя физических величин

Для повышения чувствительности и энергоемкости магнитополевого измерительного преобразователя рекомендуется ввести дополнительные колебательные контура  $L5$  и/или  $L6$  в первую и/или во вторую катушки индуктивности и включить их, как показано на рис. 6, а, б. Это достигается за счет увеличения потокосцепления между колебательными контурами  $L1$  и  $L5$ ,  $L3$  и  $L6$ , а также за счет увеличения энергоемкости.

Сенсоры могут включаться как по симметричной схеме, так и по асимметричной, — с заземлением входной клеммы «2».

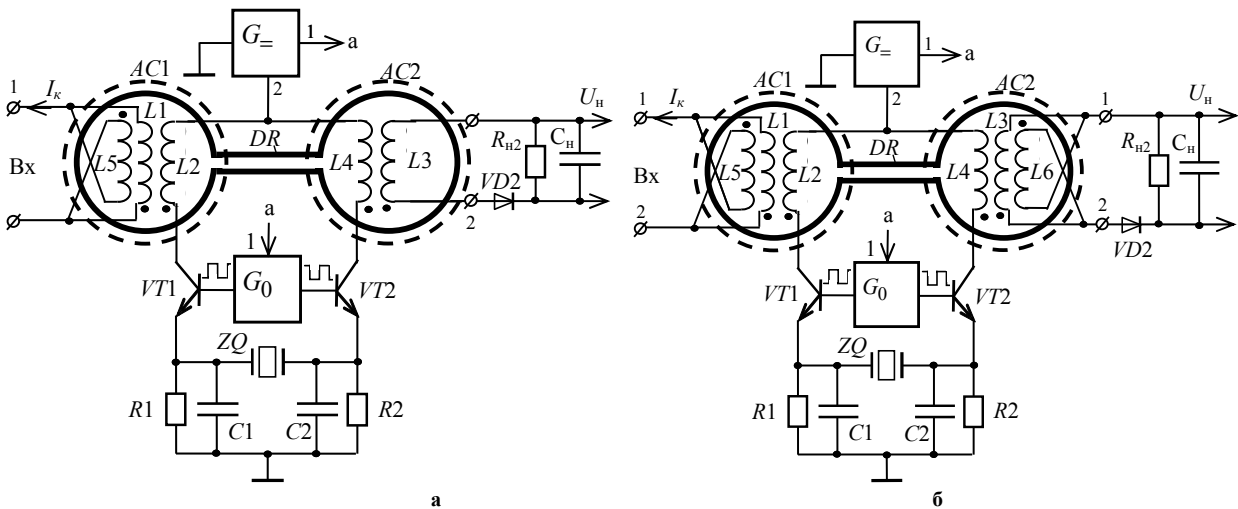


Рис. 6. Функциональная схема магнитополевого измерительного преобразователя с входным (а) и с входным и выходным (б) контурами повышенной чувствительности и емкости

**Физические процессы взаимодействия магнитного поля с отрицательно заряженными квазичастицами материала (вещества)**

Поток индукции импульсного магнитного поля воздействует строго перпендикулярно плоскости поверхности левого и правого одновитковых контуров плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа (см. рис. 7). На рис. 7 сплошными и пунктирными линиями показано действие силовых линий магнитного поля, соответственно, в нечетные и четные полупериоды низкой частоты коммутации.

В нечетный полупериод частоты коммутации на вторую катушку индуктивности  $L_1$  первой (расположенной слева) пары высокочастотных колебательных контуров действует сигнал (ток) прямоугольной формы и высокой частоты (см. рис. 1):

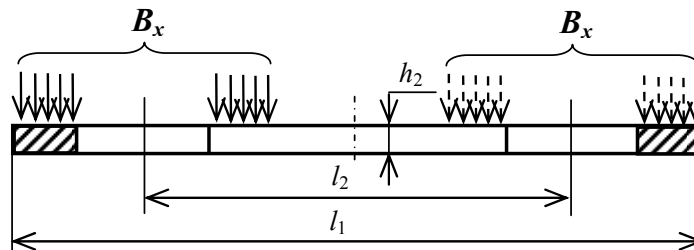


Рис. 7. Идеализированные эпюры индукции магнитного поля, воздействующего на левый и правый одновитковые контура плоской двухконтурной механической системы (вертикальное сечение)

$$i_{вч1}(t) = I_m \left( \frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right) \left( \frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\Omega_0 t}{k_2 n - 1} \right), \quad (1)$$

а на правую катушку индуктивности второй пары высокочастотных контуров — ток

$$i_{вч2}(t) = I_m \left( \frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right) \left( \frac{1}{k_2} - \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\Omega_0 t}{k_2 n - 1} \right), \quad (2)$$

средние значения которых равны между собой, т.е.

$$I_{cp} = I_{cp1} = I_{cp2} = I_m \int_0^{T_H/2} \left( \frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right) dt = I_m / k_2, \quad (3)$$

где  $I_m$  — амплитудное значение высокочастотного импульсного тока, протекающего через высокочастотный колебательный контур;  $k_2 = 2$ ;  $n$  — число гармоник.

В катушке индуктивности ток (1) создает высокочастотное импульсное магнитное поле в течение нечетных полупериодов низкой частоты коммутации  $\Omega_0 = 1/T_H$ . Энергия магнитного поля равна  $w_1 = (L_{вч1} I_m^2(t)) / k_2^2$ . Она создает, в свою очередь, магнитную силу

$$\mathbf{F}_M = k q_e (\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}_{вч}), \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий также число отрицательно заряженных частиц в объеме ИО материала;  $q_e$  — заряд квазичастицы;  $v_e$  — скорость движения частиц, принятая

одинаковой для всех квазичастиц;  $B_{\text{вч}}$  — индукция магнитного поля высокой частоты, действующую на отрицательно заряженные квазичастицы и являющаяся магнитной составляющей силы Лоренца. Так как сила Лоренца  $F_M$  (4) всегда перпендикулярна скорости  $v_e$  заряженной квазичастицы, то она не совершает работы, т.е. не изменяет значение скорости заряженной квазичастицы и ее кинетическую энергию.

Электрическая составляющая силы Лоренца (кулоновские силы отталкивания) определяется уравнением величин

$$\mathbf{F}_k = q_e \Delta E_q, \quad (5)$$

где  $\Delta E_q$  — разность напряженности электрического поля между соседними одинаково заряженными квазичастицами, которая является малой величиной по причине практически одинаковых значений отрицательных зарядов квазичастиц. Результирующая сила равна векторной сумме кулоновской и магнитной сил:

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{F}_k + \mathbf{F}_M. \quad (6)$$

Поскольку импульсное магнитное поле высокой частоты действует перпендикулярно плоскости механической системы, то в ней отрицательно заряженные квазичастицы движутся перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, а сила Лоренца является центростремительной, т.е.  $F_L = m a_{\text{ц}}$  [4]. Эта сила создает центростремительное ускорение  $a_{\text{ц}} = v^2 / R$ , в результате которого квазичастицы движутся в механической системе (см. рис. 4) по замкнутой кривой (см. рис. 7). Период обращения заряженной квазичастицы (без учёта силы тяжести) не зависит от скорости ее движения и определяется уравнением величин

$$T_q = 2\pi m_q / q_e B_{\text{вч}}. \quad (7)$$

Магнитная сила  $F_M$  возникает за счет движения заряженных квазичастиц и определяется законом Ампера. Для двух движущихся и взаимодействующих между собой заряженных квазичастиц можно записать:

$$\mathbf{F}_{12M} = q_2 \cdot (\mathbf{v}_2 \times \mathbf{B}_1), \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{21M} = q_1 \cdot (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{B}_2), \quad (9)$$

где  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  — векторы индукции импульсного магнитного поля, создаваемого при движении, соответственно, первой и второй заряженных квазичастиц в месте нахождения второй и первой;  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$  — векторы скорости первой и второй квазичастиц, соответственно.

Поскольку заряженная квазичастица взаимодействует одновременно с несколькими заряженными квазичастицами, то результирующая сила, действующая на данную квазичастицу, равна векторной сумме сил, действующих на эту частицу со стороны всех других заряженных квазичастиц.

Под действием импульсного магнитного поля отрицательно заряженные квазичастицы движутся в параллельных между собой плоскостях в одном направлении. Магнитная и кулоновская силы не дают этим квазичастицам столкнуться, т.к. являются силами действия и противодействия.

В нашем случае выражения для магнитных сил (8) и (9) не противоречат фундаментальному закону природы — принципу относительности Галилея, согласно которому физические процессы в инерциальных системах отсчёта протекают одинаково, независимо от того, неподвижна ли система или она находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения. Это обусловлено тем, что в уравнениях величин (2) и (3) векторы  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$  скорости движения заряженных квазичастиц представляют собой суммы двух векторов, — векторов  $\mathbf{v}_{01}$  и  $\mathbf{v}_{02}$  начальной скорости движения квазичастиц и векторов  $\mathbf{v}_3 = \mathbf{a}_{e1} T_{\text{вч}} / k_2$  и  $\mathbf{v}_4 = \mathbf{a}_{e2} T_{\text{вч}} / k_2$ . Последние характеризуют скорости дискретного (периодического) равноускоренного движения квазичастиц, полученного за счет искусственного равномерного воздействия на квазичастицы импульсным магнитным полем высокой частоты в течение интервала времени  $\Delta t_0 = T_{\text{вч}} / k_2$ . Тогда, для равноускоренного движения квазичастиц в интервале времени  $t_1 - t_0 = \Delta t_0$  можно записать аналитическое выражение для их скорости в виде

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_{01} + (t - t_0) \mathbf{a}_{e1} = \mathbf{v}_{01} + (t - T_{\text{вч}} / k_2) \mathbf{a}_{e1} \quad (10)$$

и

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_{02} + (t - t_0) \mathbf{a}_{e2} = \mathbf{v}_{02} + (t - T_{\text{вч}} / k_2) \mathbf{a}_{e2}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{v}_{01}$  и  $\mathbf{v}_{02}$  — начальные скорости движения квазичастиц на момент начала действия высокочастотного импульса магнитного поля ( $\{v_{01}\} \neq \{v_{02}\}$ );  $\mathbf{a}_{e1}$  и  $\mathbf{a}_{e2}$  — ускорения первой и второй квазичастиц (при  $\{a_{e1}\} \neq \{a_{e2}\}$ );  $\{v_3\} \neq \{v_4\}$ ;  $T_{\text{вч}}$  — период следования высокочастотных импульсов магнитного поля;  $k_2 = 2$ .

Следовательно, силы, действующие на заряженные квазичастицы, зависят не только от абсолютных значений скоростей, но и от ускорения, получаемого заряженной квазичастицей в результате действия импульсного магнитного поля в течение короткого интервала времени  $T_{\text{вч}} / k_2$ . Подставив (10) и (11) в (8) и (9), окончательно получим:

$$\mathbf{F}_{p1} = \mathbf{F}_k + q_2 \cdot (\mathbf{v}_{02} + \mathbf{a}_{e2} T_{\text{вч}} / k_2) \times \mathbf{B}_1, \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{p2} = \mathbf{F}_k + q_1 \cdot (\mathbf{v}_{01} + \mathbf{a}_{e1} T_{вч} / k_2) \times \mathbf{B}_2. \quad (13)$$

Квазичастицы, имеющие одинаковый заряд  $q_e$ , действуют друг на друга только при разных массах, а, следовательно, и ускорениях ( $\{a_{e1}\} \neq \{a_{e2}\}$ ). При одинаковых по значению начальных скоростях движения квазичастиц и их ускорений, т.е. при  $\{v_{01}\} = \{v_{02}\} = \{v_0\}$  и  $\{a_{e1}\} = \{a_{e2}\} = \{a_e\}$ , результирующие силы, действующие на заряженные квазичастицы, определяются в соответствии с уравнениями величин:

$$\mathbf{F}_{p1} = q_e \cdot \left( \frac{1}{k_2 \pi \epsilon_0} \frac{q_e}{r^2} + (\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2) \times \mathbf{B}_1 \right) \quad (14)$$

$$\mathbf{F}_{p2} = q_e \left( \frac{1}{k_2 \pi \epsilon_0} \frac{q_e}{r^2} + (\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2) \times \mathbf{B}_2 \right). \quad (15)$$

где  $r$  — расстояние между квазичастицами.

При этом, в каждый четный полупериод частоты высокочастотного магнитного поля, квазичастицы движутся прямолинейно, с одинаковым ускорением (равноускоренно), не мешая друг другу.

Для отрицательно квазичастиц, движущихся в материале (веществе) необходимо учитывать электрическую составляющую силы Лоренца, определяемую уравнением величин (5). Тогда, с учетом (5), результирующая сила

$$\mathbf{F}_{p1} = q_e \Delta \mathbf{E}_q + q_e \cdot (\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2) \times \mathbf{B}_1 = q_e (\Delta \mathbf{E}_q + [\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2] \times \mathbf{B}_1), \quad (16)$$

а

$$\mathbf{F}_{p2} = q_e \Delta \mathbf{E}_q + q_e \cdot (\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2) \times \mathbf{B}_2 = q_e (\Delta \mathbf{E}_q + [\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_e T_{вч} / k_2] \times \mathbf{B}_2). \quad (17)$$

Известно, что сила тока всегда пропорциональна скорости движения заряженных частиц, т.к.  $i(t) = Q \cdot v(t) / z$ , где  $z$  — это параметр решетки пространственного электрического заряда (ПЭЗ). Напряженность вихревого магнитного поля вокруг проводника с током определяется степенью ориентации заряженных частиц по вектору скорости. Степень ориентации зависит от ускорения заряженных квазичастиц. Для того, чтобы ток оставался пропорциональным скорости движения квазичастиц, необходимо осуществить равноускоренное движение квазичастиц на коротких участках пути  $l_0$ , равных между собой, т.е.  $\{l_0\} - 0 = k_2 \{l_0\} - \{l_0\} = k_3 \{l_0\} - k_2 \{l_0\} = \dots = \{l_0\}$ ). Согласно [4], необходимо, чтобы отрезки  $l_0$  были малы и равномерны.

На рис. 8 приведены графические построения, поясняющие характер изменения скорости электронов в проводниках на коротких участках пути  $l_0$  ( $k_2 = 2, k_3 = 3$ ) при воздействии импульсного магнитного поля высокой частоты  $f_{вч} = 1 / T_{вч}$ .

В случае периодического (с периодом  $T_{вч} = k_2 \pi / \omega_{вч}$ ) воздействия на квазичастицы импульсами магнитного поля, вектор ускорения равноускоренного движение опишется уравнением величин:

$$v(t) = v_m \left( \frac{1}{k_2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\sin nt}{n} \right) \text{ при } 0 < t < nk_2 \pi, \quad (18)$$

где  $n$  — не равное нулю целое число (1, 2, 3, ...);  $v_m$  — максимальная скорость заряженной частицы;  $k_2 = 2$ .

Согласно рис. 8, б, воздействие индукции импульсного магнитного поля длительностью  $\Delta t_0 = T_{вч} / k_2$  на заряженную квазичастицу придает ей ускорение  $a_e = F_k / m_e = H q_e / m_e = U q_e / m_e l$ . ( $F_k$  — кулоновская сила).

Следовательно, ток может оставаться пропорциональным скорости электронов только при условии, что скорость периодически сбрасывается в нуль (см. рис. 8, а). В таком случае ток характеризуется длиной  $L_e$  свободного пробега квазичастиц и найти её можно из условия (см. построения на рис. 8)  $v_{cp} = a_e T_{вч} / k_2$

и

$$L_e = v_{cp} T_{вч} = k_2 v_{cp}^2 / a_e \quad (19)$$

или

$$L_e = \frac{k_2 m_e}{H q_e} \cdot \left( \frac{\gamma^*}{\sigma} \right). \quad (20)$$

Ток в металлах может быть пропорциональным напряжению только при периодическом сбросе кинетической энергии.

Периодичность сбросов связана со структурой решетки и плотностью упаковки атомов. Характеристика периодичности — длина свободного пробега электрона  $L_e$ . Так, для меди длина свободного пробега оказалась равной  $L_e = 2,987 \cdot 10^{-9}$  м, что составляет  $L_e / b = 8,26$  периодов атомной структуры.

Следует отметить, что значение магнитной индукции определяется как произведение тока на число витков контура, т.е.  $B_0 = \mu_0 n I_0$ , где  $n = N / k_2 L_c$  — число витков ( $N / k_2$ , где  $k_2 = 2$ ) на единицу длины

соленоида (первого и второго высокочастотных колебательных контуров),  $nI_0$  – число ампер-витков. Здесь рассматривается случай, когда  $I_0 = \text{const}$ , а катушка соленоида проведена двоянным медным проводом. Вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}_0$  направлен по оси соленоида, перпендикулярной плоскости механической системы.

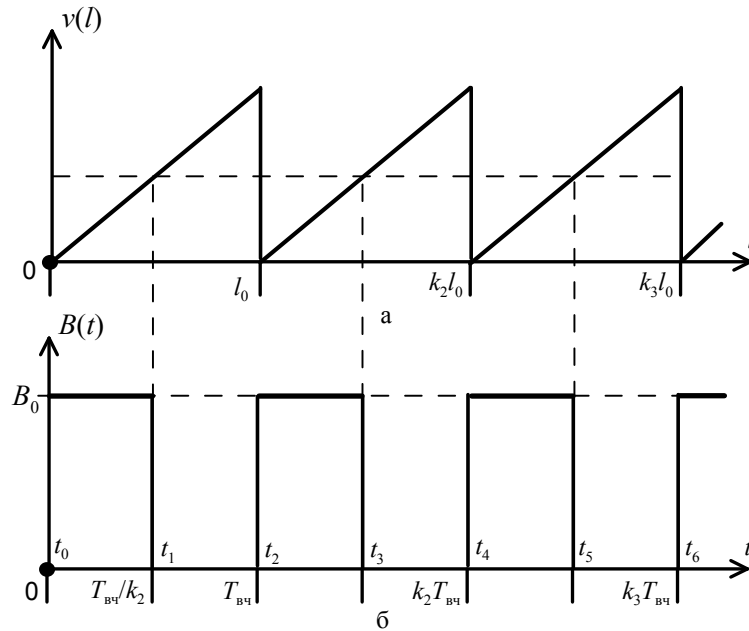


Рис. 8. Характер изменения скорости электронов в проводниках на коротких участках пути ( $k_2 = 2, k_3 = 3$ ) при воздействии импульсного магнитного поля высокой частоты  $f_{вч} = 1/T_{вч}$

Силовые линии магнитного поля с индукцией  $B_0$  ( $\{B_0\} = \text{const}$ ) действуют на отрицательно заряженные частицы  $q_i$ , движущиеся со скоростью  $\mathbf{v}_i$ , с силой Лоренца, равной  $\mathbf{F}_{ли} = q_i [\mathbf{v}_i \times \mathbf{B}_0]$  (или  $F_{ли} = q_i v_i B_0 \sin \alpha_i$ , где  $\alpha_i$  — угол между векторами скорости и магнитной индукции, причем направление вектора  $\mathbf{F}_{ли}$  перпендикулярно им обоим и направлено по правилу буравчика).

Еще раз подчеркнем, сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения отрицательно заряженной квазичастицы. Она не совершает работы, т.е. не изменяет скорость движения отрицательно заряженной квазичастицы и её кинетическую энергию. Магнитное поле изменяет только направление скорости движения этой квазичастицы, а не её значение.

В общем виде сила Лоренца описывается уравнением величин  $\mathbf{F}_{л0} = q_i (\mathbf{E}_0 + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}_0)$ , из которого следует, что между отрицательно заряженной квазичастицей и магнитным полем энергетическое взаимодействие отсутствует. По сравнению с электрическим полем, действие магнитного поля на эти квазичастицы является более ограниченным. Именно поэтому магнитное поле применяется для воздействия на электроны значительно реже, нежели электрическое поле. При постоянном значении индукции магнитного поля значение скорости движения отрицательно заряженных квазичастиц практически будет постоянным.

Сила Лоренца  $F_{л}$  искривляет траекторию движения отрицательно заряженных квазичастиц в дугу окружности. Направление поворота этих квазичастиц в магнитном поле в соответствии с правилом левой руки удобно определяется, согласно [6], следующим образом. Если смотреть в направлении магнитных силовых линий, которые действуют перпендикулярно плоскости поверхности, например, левого одновиткового контура механической системы, то направление движения отрицательно заряженных квазичастиц будет осуществляться по часовой стрелке (см. рис 9, б, — направление утолщенных стрелок вдоль контура механической системы). В результате действия силы Лоренца, эти квазичастицы станут двигаться по замкнутому контуру механической системы со скоростью  $v_k$ .

Воздействие высокочастотного импульсного магнитного поля с индукцией  $\mathbf{B}_x(t) = \text{const} = \mathbf{B}_0$  на первый одновитковый колебательный контур механической системы замкнутого типа силовыми линиями магнитного поля приводит к упорядоченному движению по всему замкнутому контуру отрицательно заряженных частиц. Их количество  $n$  присуще только тому ИО материала, из которого выполнена механическая система (см. рис. 9, а, б). На рис. 9 приведено графическое представление потока отрицательно заряженных частиц, движущихся по замкнутому контуру плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа и динамического взаимодействия (отталкивания за счет кулоновских сил и не только) их с электронами правого колебательного контура  $L4C4$  (см. рис. 1, б)



Каждая частица имеет заряд  $q_0$ . Скрытую энергию Ферми составляют свободные и связанные электроны (частицы с полусцелым спином, обычно  $1/2$ ).

Проведенные экспериментальные исследования показали справедливость теоремы Умова – Пойтинга [7], согласно которой «электрическая энергия от генератора к приемнику передается не по проводам линии электропередачи, а электромагнитным полем, окружающим эти провода. При этом замкнутая линия электропередачи выполняет следующие функции:

- 1) создает условия для получения электромагнитного поля,
- 2) обеспечивает сцепление электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля между собой и равенство  $\epsilon_0 \mu_0 v^2 = \text{const}$ , где  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны ( $v = c / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны);
- 3) осуществляет ориентационное равновесие составляющих этих полей;
- 4) обеспечивают синфазное изменение составляющих электромагнитной волны во времени;
- 5) является направляющими для потока электроэнергии».

В результате силового действия соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты, например, на первый контур плоского двухконтурного волновода  $DR$ , расположенного соосно и под контурами  $L1$  и  $L2$  первой катушки индуктивности, электроны и другие отрицательно заряженные квазичастицы исследуемого материала волновода начнут двигаться с большой скоростью по замкнутому контуру указанного волновода (см. рис. 9).

Такова сущность физических процессов, протекающих в двухконтурном волноводе, т.е. в механической системе замкнутого типа.

**Уравнение величин, описывающее замкнутый контур движения квазичастиц**

В ИО материала движение отрицательно заряженных квазичастиц осуществляется по плоскому контуру механической системы замкнутого типа (см. рис. 4). Одна из траекторий движения квазичастицы может быть описана выведенным автором уравнением величин

$$y(x_i) = \pm S_K \sqrt{\sqrt{a^4 + 4(r + \Delta r)^2 x_i^2} - x_i^2 - r^2 + \Delta h_2 \mp \Delta h_1} \Big|_{x_1}^{x_2}, \quad (21)$$

которое получено впервые и с математической точки зрения, представляет собой функцию шестого порядка.

В (21) используются следующие обозначения:  $S_K$  — безразмерный масштабный коэффициент;  $i$  - я точка пути;  $\Delta h_1$  — смещение функции шестого порядка;  $\Delta h_2$  — смещение функции второго порядка;  $r$  — радиус окружностей первого и второго участков пути;  $\Delta r$  — длина линейного участка пути;  $a$  — параметр, связывающий любую точку  $E_i$  участка пути с фокусными расстояниями  $F_1$  и  $F_2$  круговых орбит ( $a = \sqrt{F_1 E_i \cdot F_2 E_i}$  (см. рис. 10) );  $x_1$  и  $x_2$  — нижняя и верхняя границы изменения переменной. Рекомендуется выбирать  $a \geq r\sqrt{2} = 1,43 \cdot r$ ; при  $a = 1$   $r = 0,699$ , при  $a > 1$   $r > 0,699$ .

Исследования показали, что отклонения траекторий движения от окружности не превышает 1%. Несмотря на отклонение от идеальной реальной окружности, путь, проходимый отрицательно заряженными частицами, будет тот же, что и при идеальных окружностях.

Работа, совершаемая консервативными силами магнитного поля ( $A_{ACB} = A_{ADB} = A_{AOB}$ ) не зависит от

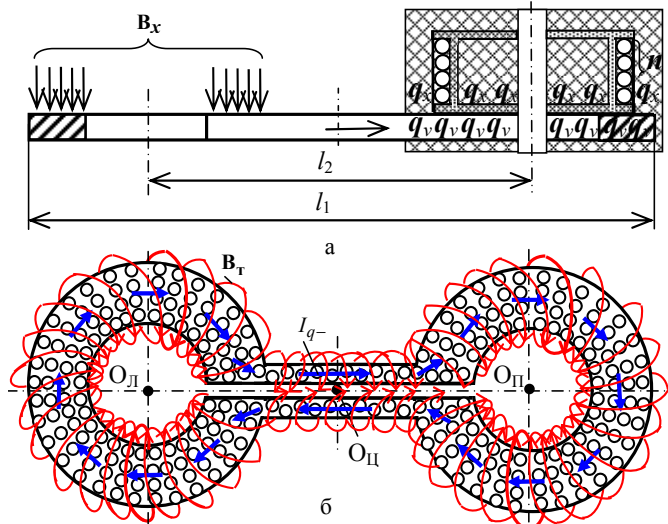


Рис. 9. Графическое представление потока отрицательно заряженных частиц, движущихся по замкнутому контуру плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа

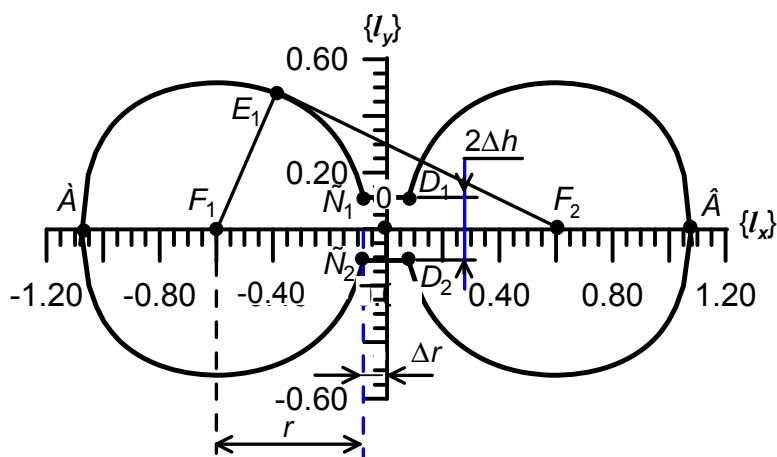


Рис. 10. Графическое построение траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц внутри механической системы с помощью IIII Graher 7

пути  $L_{ik}$ , проходимою  $i$ -й квазичастицей вдоль замкнутого контура механической системы (см. рис. 10) и равна нулю, т.е.

$$\oint_S \mathbf{F}_M dl = A_{AB} + A_{BA} = A_{AB} - A_{BA} = 0. \quad (24)$$

Циркуляция вектора силы  $\mathbf{F}_M$  по замкнутому контуру описывается интегралом  $\oint_S \mathbf{F}_M dl$ . На рис. 10 приведена замкнутая кривая, характеризующая одну из траекторий движения отрицательно заряженных частиц в исследуемом материале при следующих значениях параметров:

$$y(x) = \pm 1,2 \sqrt{\sqrt{0,78^4 + 4(0,78 + 0,12)^2 x^2 - x^2 - 0,78^2} - 0,144} \mp 0,121. \quad (22)$$

где  $S_k = 1,2$ ,  $k_0 = -0,144$ ,  $\Delta y_0 = 0,121$ ,  $a = 0,78$ ,  $r = 0,78$ ,  $\Delta r_0 = 0,12$  и  $-1,75 \leq x_i \leq 1,75$ .

В программе Golden Software Graher 7 эта функция описывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.2 * \text{sqrt}(\text{sqrt}((\text{sqrt}(0.78 * 0.78 * 0.78 * 0.78 + 4 * x * x * 0.9 * 0.9) - x * x - 0.78 * 0.78)) - 0.144) - 0.121, \\ -1.2 * \text{sqrt}(\text{sqrt}((\text{sqrt}(0.78 * 0.78 * 0.78 * 0.78 + 4 * x * x * 0.9 * 0.9) - x * x - 0.78 * 0.78)) - 0.144) + 0.121. \end{array} \right\}_{x_1=-1,75}^{x_2=1,75} \quad (23)$$

В замкнутом контуре в процессе движения свободных электронов возникает высокочастотный ток переноса, а в процессе колебаний других электронов и отрицательно заряженных квазичастиц, привязанных к узлам пространственной кристаллической решетки и движущихся в пределах своего среднестатистического положения, возникает высокочастотный ток смещения. Вместе эти токи создают вихревое магнитное поле, которое взаимодействует с созданными ими вихревым электрическим полем. Результатом взаимодействия полей является порождение высокочастотной электромагнитной волны, которая и переносит энергию и информацию по замкнутому контуру волновода  $DR$  слева на право и справа на лево.

Благодаря бесконечному движению электронов и отрицательно заряженных квазичастиц, бесконечно долго текут и токи переноса и смещения. В колебательном контуре  $L4$  второй катушки индуктивности (см. рис. 1) наводится ЭДС, пропорциональная значению искомой физической величины.

Эта ЭДС трансформируется в напряжения  $u_1(t)$  на выходе колебательного контура  $L3$  второй катушки индуктивности, которое выпрямляется с помощью диода  $VD2$ , постаает на  $RC$ -нагрузку и усредняется (см. рис. 1). Средневыпрямленное значение выходного напряжения, которое поступает на вход цифрового вольтметра (на рис. 1 не показано), описывается уравнением величин

$$U_{св1} = \sqrt{\frac{R_H}{T'_K} \int_0^{T'_K} |i_1(x, t)| dt} = k_T S_1 i_1(x), \quad (25)$$

где  $T'_K = nT_K$  — время интегрирования, которое выбирается равным нескольким периодам низкой частоты коммутации ( $n = 1-10$ );  $R_H$  — сопротивление нагрузочного резистора;  $i_1(x, t)$  — ток через нагрузочный резистор;  $k_T$  — коэффициент трансформации (отношение числа витков колебательных контуров  $L3$  и  $L4$ ).

#### Функция преобразования магнитополевого измерительного преобразователя

В результате экспериментальных исследований МП ИП, по схеме, приведенной на рис. 1, были получены зависимости выходного напряжения от входного, т.е.  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . На рис. 11 приведены функции преобразования для двух частных случаев: механическая система замкнутого типа (волновод  $DR$ ) выполнена из медных пластин толщиной 0,5 мм и 2,4 мм. В результате были получены два разных вида функции преобразования (см. рис. 11) при значениях коэффициента трансформации между парами высокочастотных катушек индуктивности  $L1$ ,  $L2$  и  $L4$ ,  $L3$  равном единице.

В первом случае (рис. 11, а), при изменении входного напряжения от 0,01 В до 1,5 В, выходное напряжение изменялось от 0,8 В до 0,2 В. Во втором случае (рис. 11, б), при изменении входного напряжения от 0,01 В до 1,7 В, выходное напряжение уменьшалось от 1,39 В до 0,89 В. При этом в первом случае линейный участок графика приходится на диапазон значений входных напряжений от 0,01 В до 0,4 В, а нелинейный — от 0,4 В до 1,1 В. Перекрытие выходного напряжения составляет 0,6 В. Для второго случая линейный участок графика приходится на входное напряжение от 0,9 В до 1,7 В, а нелинейный — от 0,01 В до 0,8 В. Перекрытие составляет 0,5 В. При увеличении числа витков катушки индуктивности  $L2$  и  $L3$  в 5 раз, выходное напряжение также увеличится в 5 раз.

Полученные зависимости (функции преобразования) математически представляют собой многочлены третьей степени и описываются, соответственно, уравнениями величин

$$U_{вых1} = 0,81 - 0,884U_{вх} + 0,274U_{вх}^2 + 0,027U_{вх}^3 \quad (26)$$

и

$$U_{вых2} = 1,395 - 0,068U_{вх} - 0,22U_{вх}^2 + 0,05U_{вх}^3. \quad (27)$$

В общем виде графики функции преобразования представляют собой кубическую или

квадратичную параболы и описываются уравнениями величин:

$$U_{\text{ВЫХ1}} = U_0 - S_{\text{Л1}}U_{\text{ВХ}} + S_{\text{Н1}}U_{\text{ВХ}}^2 + S_{\text{Н2}}U_{\text{ВХ}}^3 \quad (28)$$

и

$$U_{\text{ВЫХ2}} = U_0 - S_{\text{Л1}}U_{\text{ВХ}} + S_{\text{Н1}}U_{\text{ВХ}}^2 \quad (29)$$

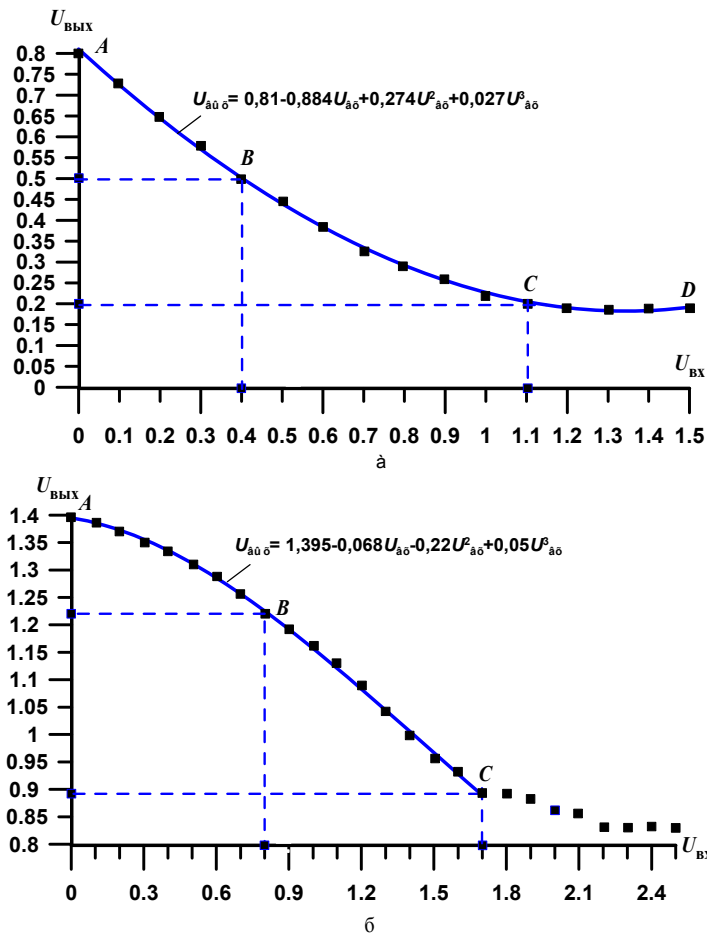


Рис. 11. Графики зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при использовании волновода, который выполнен: а) из листовой меди толщиной 0,5 мм, б) из листовой меди толщиной 2,5 мм

Установлена возможность регулирования чувствительности преобразователя. Чувствительность и вид функции преобразования можно изменять путем изменения силы тока через катушки индуктивностей  $L2$  и  $L4$ , изменением коэффициента трансформации между катушками индуктивности каждой пары высокочастотных колебательных контуров, выбором соответствующей марки и толщины листового материала (металла) из которого изготавливается волновод  $DR$  и/или выбором рабочей точки преобразователя.

Описанные магнитополевые методы измерений и соответствующие измерительные преобразователи представляют научный и технический интерес как для исследований свойств веществ и материалов на новом физическом принципе измерений, так и при создании приемников электромагнитных волн, генераторов свободной энергии, средств передачи электрической энергии посредством однопроводной линии электропередач и т.д.

**Выводы.** Магнитополевая теория измерений — это система научных знаний о закономерностях взаимодействия энергии электромагнитных полей с энергией отрицательно заряженных квазичастиц материалов, объединенная концепцией волнового подхода к переносу и преобразованию энергии и информации через материал, опирающаяся на новый физический принцип измерений, на определенную совокупность фундаментальных законов электромагнетизма, категорий, условий, научных принципов, методов и методологий.

Сформулировано 24 цели магнитополевой теории измерений, что характеризует широкие возможности данной теории.

В качестве принципа магнитополевых измерений использовано открытое автором явление переноса энергии и информации сквозь вещество или материал. Предложено восемь определений принципа магнитополевых измерений, каждое из которых акцентирует внимание на тот или иной аспект используемого явления.

Сформулированы и подробно изложены этапы измерений физических величин магнитополевым методом, что расширяет наши представления о магнитополевых измерениях.

Приведены и описаны принципиальные схемы магнитополевых преобразователей (широкополосного и

избирательного), реализующих новый принцип измерений и преобразований физических величин.

Отмечается особенности схмотехнических решений магнитопольевых измерительных преобразователей. Важными элементами преобразователей являются кварцевый резонатор, волновод (или механическая система замкнутого типа), выполненный, как правило, из металла, а также магнитные экраны с рассоложенными в них колебательными контурами.

Показана возможность использования в схемах магнитопольевых измерительных преобразователях пассивных и активных резистивных, емкостных, фотодиодных сенсоров, варикапов, внешних источников тока и напряжения и т.д.

Описаны физические процессы взаимодействия магнитных полей с отрицательно заряженными квазичастицами, что расширяет наши представления о сущности физического принципа измерений.

Проведенные экспериментальные исследования показали справедливость теоремы Умова – Пойнтинга, согласно которой электрическая энергия и заключенная в ней информация переносится от генератора к приемнику не по проводам линии электропередачи, а посредством электромагнитной волны.

Подчеркивается, что замкнута линия электропередач выполняет следующие функции: 1) создает условия для получения и сохранения энергии электромагнитного поля, 2) обеспечивает сцепление электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны между собой; 3) осуществляет ориентационное равновесие составляющих этих полей; 4) обеспечивает синфазное изменение составляющих электромагнитной волны во времени; 5) является направляющей для потока электроэнергии.

Показано, что траектория движения отрицательно заряженной квазичастицы по двухконтурному волноводу, представляет собой контур из двух соединенных между собой идентичных колец. С алгебраической точки зрения такой замкнутый контур представляет собой функцию шестого порядка. Она впервые выведена автором и получила название «бикольцоид».

### Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 3. Явление переноса, используемые фундаментальные законы, условия и проблемы измерений / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 165–178.

2. Патент України на винахід № 115190. Спосіб вимірювального перетворення фізичних величин та пристрій для його здійснення / Кондратов В.Т. – Бюл. № 7, 10.04.2017.

3. Патент України на винахід № 117538. Спосіб магнітопольового перетворення енергії негативно заряджених квазичастинок матеріалу (речовини) або дискретних енергетичних рівнів Ландау у напругу і в адекватну енергію радіоімпульса / Кондратов В.Т. – Бюл. № 15, 10.08.2018.

4. Действие магнитного поля на движущийся заряд [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://class-fizika.narod.ru/10\\_16.htm](http://class-fizika.narod.ru/10_16.htm).

5. Движение заряженных частиц в однородном электрическом поле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/2969511/page:22/>.

6. Движение электронов в однородном магнитном поле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.e-reading>.

7. Теорема Умова-Пойнтинга для электромагнитного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://studopedia.ru/3\\_43\\_182\\_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html](http://studopedia.ru/3_43_182_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html).

### References

1. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmereniy s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informatsii skvoz material ili veschestvo. CHast 3. YAvlenie perenosa, ispolzuemyie fundamentalnyie zakonyi, usloviya i problemyi izmereniy / V.T. Kondratov // Visnik Hmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Tehnichni nauki. – 2018. – № 5. – S. 165–178.

2. Patent Ukrainy na vynakhid № 115190. Sposib vymiriuvalnoho peretvorennia fizychnykh velychyn ta prystrii dlia yoho zdiisnennia / Kondratov V.T. – Biul. № 7, 10.04.2017.

3. Patent Ukrainy na vynakhid № 117538. Sposib mahnitopolevoho peretvorennia enerhii nehatyvno zariadzhenykh kvazichastynok materialu (rechovyny) abo dyskretnykh enerhetychnykh rivniv Landau u napruhu i v adekvatnu enerhiuu radioimpulsa / Kondratov V.T. – Biul. № 15, 10.08.2018.

4. Deystvie magnitnogo polya na dvijuschisysya zaryad [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupu : [http://class-fizika.narod.ru/10\\_16.htm](http://class-fizika.narod.ru/10_16.htm).

5. Dvijenie zaryajennykh chastits v odnorodnom elektricheskom pole [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupu : <https://studfiles.net/preview/2969511/page:22/>.

6. Dvijenie elektronov v odnorodnom magnitnom pole [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupu : <https://www.e-reading>.

7. Teorema Umova-Poytinga dlya elektromagnitnogo polya [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupu : [http://studopedia.ru/3\\_43\\_182\\_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html](http://studopedia.ru/3_43_182_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html).

Рецензія/Peer review : 15.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

## ДЕЯКЕ МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

*Розглянуто основні етапи розвитку інформаційних систем та особливості розв'язання функціональних задач управління. Визначено важливість характеру інформаційного й математичного забезпечення для розв'язання функціональних задач з використанням систем підтримки прийняття рішень та забезпечення комп'ютерною підтримкою прийняття рішень зі слабоструктурованих та неструктурованих проблем організаційного управління.*

**Ключові слова:** управлінська інформаційна система, системи підтримки прийняття рішень, структуровані рішення, неструктуровані рішення, програмний агент.

G.I. MIKHALEVSKA, V.TS. MIKHALEVSKYI  
Khmelnytsky National University

## SOME MATHEMATICAL AND INFORMATION SUPPORT OF SUPPORTING SYSTEMS FOR MAKING DECISIONS

*The article deals with the main stages of the development of information systems and features of the solution of functional management problems. It is determined the importance of the nature of information and mathematical support for solving functional problems with the usage of decision support systems and providing computer support for making decisions from weakly structured and unstructured organizational management problems. At the stages of the development of information systems of the organizational type, the structure and abundance of data and computational procedures have changed significantly and become criteria for the allocation of generations of these systems. The development of information systems, especially the solution of functional problems, depended on the nature of information and mathematical support. Information systems, known as "Management Information System", which main function is to provide information management, are characterized by a structured flow of information, integration of data processing tasks, generation of requests and reports. Data models and dictionaries are widely used to describe the data. Effective forecasting involves the presence of a system of support for decision-making by the mathematical apparatus of methods in forecasting and experience of models application. The purpose of applying decision support systems is to increase the manager's ability and ability to make correct and scientifically sound decisions. The main types of using systems are the text DSS, hypertext DSS, oriented for using databases and data warehousing databases, table DSS, oriented on the models DSS, hybrid DSS. These systems have features that allow users to receive information or knowledge from an information system that has been programmed and configured by the user to take into account the experience of the user and his enterprise, as well as the capabilities of mathematical models and data warehouses that improve the quality of decision-making. The further development of information systems leads to the construction of computing environments that include e-commerce, new analytics capabilities, collaborative collaboration opportunities, design, and development of new products.*

**Keywords:** management information system, support systems of making decisions, structured solutions, unstructured solutions, program agent.

**Постановка проблеми.** На етапах розвитку інформаційних систем організаційного типу структура і надмірність даних та процедури обчислень значно змінювалися та ставали критеріями для виділення поколінь цих систем. Розвиток інформаційних систем, особливості розв'язання функціональних задач залежали від характеру інформаційного й математичного забезпечення.

*Інформаційні системи, відомі під назвою «Management Information System» — MIS («управлінські інформаційні системи», або «інформаційні системи в менеджменті»), головною функцією яких є забезпечення керівництва інформацією, характеризуються структурованим потоком інформації, інтеграцією задач оброблення даних, генерування запитів і звітів [1, 2]. Для опису даних широко застосовуються моделі та словники даних. Семантика даних, тобто вивчення їх змісту незалежно від окремих прикладних програм, стала самостійною галуззю досліджень. Створення та використання інформаційних систем організаційного управління, створення багатьох автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), систем автоматизованого проектування конструкцій і технологій (САПР) мало великий вплив на зміну характеру діяльності управлінського персоналу.*

**Формулювання цілей статті (Постановка завдання).** Дослідити особливості розв'язання функціональних задач управління із використанням системи підтримки прийняття рішень, забезпечених комп'ютерною підтримкою прийняття рішень зі слабоструктурованих та неструктурованих проблем організаційного управління.

**Виклад основного матеріалу.** Системи підтримки прийняття рішень – СППР (Decision Support Systems – DSS) – інтерактивні комп'ютерні системи, які призначені для підтримки різних видів діяльності в разі прийняття рішень стосовно слабоструктурованих або неструктурованих проблем [1, 2]. Інтерес до СППР як перспективної галузі використання обчислювальної техніки та інструментарію підвищення ефективності праці у сфері управління економікою постійно зростає. У багатьох країнах розробка та впровадження СППР перетворилося на сферу бізнесу, що швидко розвивається [3, 4].

СППР мають загальне не тільки інформаційне, але й математичне забезпечення — бази моделей, тобто реалізовано ідею розподілу обчислень подібно до того, як розподіл даних став вирішальним фактором у звичайних інформаційних системах. Усвідомлення важливості розподілу обчислень в автоматизованих

розрахунках виникло тоді, коли було помічено, що в багатьох прикладних програмах виконуються аналогічні обчислення, а індивідуальні фактори, які враховуються в прикладних програмах для допомоги конкретному користувачеві, мають незначні відмінності. Крім того, спостерігалось значне дублювання дій і процедур під час розроблення, реалізації та тестування цих обчислювальних функцій.

Сучасний етап розвитку економіки і бізнесу характеризується широким застосуванням для оброблення інформації та комп'ютерної підтримки рішень новітніх засобів інформаційних технологій, основним вираженням яких є інформаційні системи різного призначення й різної проблемної орієнтації. В загальному вигляді *інформаційну систему можна визначити як автоматизовану людино-машинну систему, визначальною особливістю якої є те, що вона забезпечує інформацією користувачів із різних організацій.* Для проблематики економіки й бізнесу використовуються здебільшого інформаційні системи організаційного типу (ICOT).

Нині застосовуються сотні типів прикладних інформаційних систем різного призначення й різної проблемної орієнтації, причому їх кількість постійно зростає. Увесь континуум типів прикладних інформаційних систем зображено на рис. 1.

Полярні позиції в цьому діапазоні посідають два типи систем: інформаційні системи в менеджменті (ICM), котрі інколи називають системами оброблення транзакцій (COT), та експертні системи (ЕС). Цю полярність занесено в таблицю 1.



Рис. 1. Континуум типів прикладних інформаційних систем

Таблиця 1

**Порівняльні характеристики інформаційних систем у менеджменті та експертних систем**

Характеристика	Інформаційні системи в менеджменті	Експертні системи
Логіка рішень	лінійна логіка, формалізовані (програмовані) процедури рішень	спеціалізовані евристичні, що ґрунтуються на базах знань і правилах виводу
Забезпечення звітів	регулярні звіти	нерегулярні звіти
Підтримка рішень	відсутність підтримки рішень	система сама створює рішення, відтворюючи логіку мислення людини-експерта

Проміжне місце між цими полярними інформаційними системами, виходячи з конкретних описів названих трьох визначальних характеристик (логіки рішень, забезпечення звітів та підтримки рішень), посідають системи підтримки прийняття рішень (СППР) і виконавчі інформаційні системи (ВІС) як особлива форма СППР. Зрозуміло, що існують десятки типів комбінованих інформаційних систем, яким можна поставити у відповідність певну позицію на рис. 2. Водночас і для головних типів інформаційних систем існує багато різновидів. Опишемо сучасні прогресивні підходи до створення створення інформаційних систем (ІС), а також новітні засоби інформаційних технологій, котрі тією чи іншою мірою відбивають нинішній рівень методології створення ІС (рис. 2).

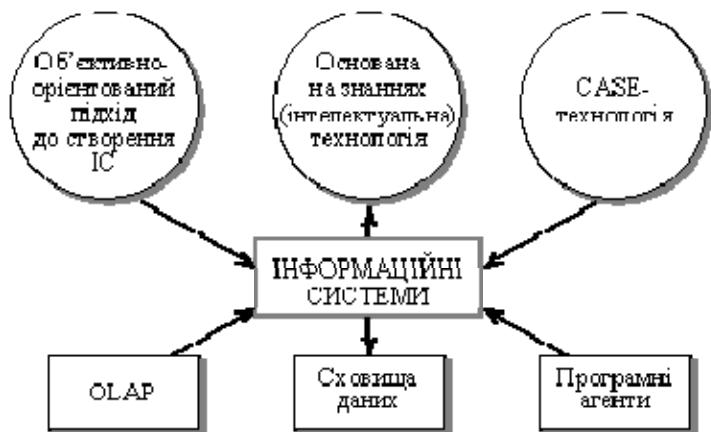


Рис. 2. Сучасні концепції створення інформаційних систем

Сучасні концепції створення інформаційних систем різного призначення ґрунтуються, в основному, на трьох підходах: *об'єктно-орієнтованій технології, CASE-технології та основаній на знаннях (інтелектуальній) технології.* Об'єктно-орієнтована технологія (Object-Oriented Technologies) стосується, насамперед, створення програмного забезпечення інформаційних систем. Спонукальним мотивом появи принципово нового підходу у програмуванні стало те, що в динамічному і конкурентному середовищі застосування ІС необхідно часто змінювати прикладні програми. Об'єктно-орієнтована методологія на даний час є досить ґрунтовно відпрацьованим підходом до створення програмних продуктів. Виокремлені і розроблені головні її компоненти: об'єктно-орієнтовані аналіз, проектування та програмування. Технологія об'єктно-орієнтованого проектування стала, у свою чергу, підґрунтям інженерії інформаційних систем – CASE-технології.

CASE (Computer-Aided Software/System Engineering) – технологія – сукупність технологічних та інструментальних засобів, що дають змогу максимально систематизувати й автоматизувати всі етапи створення програмного забезпечення інформаційних систем та інших ділових і комерційних програмних продуктів. Інжиніринг програмного забезпечення потребує принципово нового підходу до життєвого циклу

ПЗ, зокрема, послідовність етапів розроблення така: прототипування (макетування), проектування специфікацій, контроль проекту, генерування кодів, системне тестування, супроводження. Кожний із цих етапів має бути максимально автоматизованим.

Базована на знаннях (інтелектуальна) технологія передбачає впровадження в інформаційні системи та відповідні прикладні програми елементів штучного інтелекту, зокрема, баз знань і правил виводу для оброблення якісної інформації та природної мови за створення користувацького інтерфейсу. Інформаційні системи, котрі містять елементи штучного інтелекту, називаються *інтелектуальними інформаційними системами*. До інформаційних систем, котрі повністю базуються на знаннях і правилах маніпулювання ними, належать експертні системи. Створені також окремі продукти на базі комерційних технологій штучного інтелекту. Останніми роками створено нові засоби інформаційних технологій, зокрема, *OLAP, сховища даних, програмні агенти*, котрі застосовуються і самостійно, і як компоненти інформаційних систем. Безумовно, використання їх в інформаційних системах має комплексний характер, проте вони можуть розглядатися як окремі типи програмних засобів, право на розроблення яких виборюють десятки найбільших фірм світу.

Програмні агенти — це автономні програми, котрі автоматично виконують конкретні завдання з моніторингу комп'ютерних систем і збору інформації в мережах. Вони діють від імені користувача для забезпечення бажаних результатів, так само як людина-агент діє в інтересах замовника, щоб розширити його можливості. Сучасні програмні агенти, котрі постійно еволюціонують, не тільки проводять спостереження і виконують різні вимірювання, але й розв'язують завдання щодо управління мережами. Зокрема, інтелектуальні агенти здатні автоматизувати численні операції керування мережами, наприклад, вибір оптимального трафіка, контроль за завантаженням, поновлення даних за спотворень у процесі обміну тощо. Крім того, інтелектуальні агенти можуть застосовуватися і в інших галузях: для передавання повідомлень, вибирання інформації, автоматизації ділових процедур.

Існує багато типів програмних агентів (стаціонарні й мобільні та ін.), котрі розроблені з застосуванням результатів досліджень у нейронних мережах, нечіткої логіки, інтерпретації текстів природною мовою, колаборативної фільтрації:

- **Функції.** Агент виконує низку завдань за дорученнями користувача (або іншого агента).
- **Можливості щодо обміну інформацією.** Агент мусить мати можливість обмінюватися інформацією з користувачем (а також іноді з іншими агентами), щоб отримувати від нього інструкції, повідомляти йому про хід і завершення виконання завдань і передавати отримані результати.
- **Автономність.** Агент працює без прямого втручання користувача. Завдання, що виконуються агентом, можуть бути найрізноманітнішими — від щонічного резервного копіювання даних до пошуку (за дорученням користувача) продавця, що пропонує зазначений продукт за найнижчою ціною.
- **Моніторинг.** Щоб мати можливість виконувати свої завдання в автономному режимі, агент має бути здатним контролювати середовище, в якому він діє.
- **Активация.** Щоб мати можливість працювати в автономному режимі, агент має бути здатним впливати на своє робоче середовище за допомогою механізму активзації (самостійного переходу).
- **«Розумність».** Агент має бути здатним інтерпретувати події, що контролюються ним, щоб ухвалювати належні рішення.
- **Безперервність роботи.** Агенти мають виконувати свої завдання постійно у часі.
- **«Індивідуальність».** Деякі агенти можуть мати добре виражений індивідуальний «характер».
- **Адаптивність.** Деякі агенти, ґрунтуючись на нагромадженому досвіді, автоматично пристосовуються до звичок і переваг своїх користувачів і можуть пристосовуватися до змін у навколишньому середовищі.
- **Мобільність.** Деякі агенти мають допускати можливість переміщення їх в інші комп'ютери, у тому числі й на системи іншої архітектури та інші платформи.

Програмні агенти різняться за їх складністю та функціями. Як приклад, розглядають системи електронної пошти, які містять агентів, що допомагають оперувати великою кількістю повідомлень, які люди отримують кожного дня. Агент фільтрує пошту, попереджує про небезпеку, про наявність пріоритетних повідомлень, перенаправляє повідомлення у разі відсутності користувача і відкидає повідомлення за його вказівками.

Програмні агенти, що самі навчаються, спостерігають за тим, як користувач реально використовує програму, і пропонують виконувати це самі автоматично. Наприклад, якщо користувач читає всі повідомлення спершу від керівника (шефа), то агент міг би запропонувати помістити всі його повідомлення на початку списку. Агент може керуватися часом, подією або алгоритмом чи деякою їх комбінацією. Наприклад, агент міг би бути запрограмованим так, щоб попередити користувача про небезпеку, коли ціна на сировину перевищить заданий заздалегідь рівень. Або (приклад *керування за часом*), агент в кінці дня перевіряє, рівень запасів на складі, формує заявку на закупівлю у випадку якщо запасів недостатньо. Попереджувачі агенти постійно переглядають середовище з метою пошуків певної інформації. Наприклад, агент може постійно шукати інформацію про клієнтів в сховищах даних і Інтернеті та надсилати попереджати менеджера, що інформація знайдена. Керований користувачем агент має шукати інформацію тільки тоді, коли йому дана на це вказівка.

В інформаційних системах, зокрема в СППР, програмні агенти можуть застосовуватися для пошуку

в базах даних потрібної для користувача інформації, для її аналізу з метою виявлення тенденцій або розробки моделей. Крім того, інтелектуальні агенти можуть швидко отримувати інформацію для ідентифікації незвичайних ситуацій, що дасть змогу користувачеві негайно на них зреагувати.

Користувачі інформаційних систем можуть знаходити інформацію з використанням розумних агентів на конкретну дату або здійснювати пошук за подіями. Наприклад, менеджер може виконувати регулярну перевірку браку або пропуску звітних даних для висвітлення через індикатори тих проблем, на які необхідно звернути увагу. Менеджер за допомогою розумного агента може також знаходити інформацію про просування товарів вище запланованого рівня або після досягнення конкретним показником точно визначеного рівня.

Результати роботи агентів можуть поєднуватися з іншими блоками інформаційної системи. Наприклад, агент може знайти інформацію, яку слід автоматично імпортувати до задачі з формування прогнозу для визначення майбутнього попиту. За бажання інший агент може бути переключений на результати розв'язання деяких задач для автоматичного інформування управлінського персоналу.

Програмні агенти включаються в програмне забезпечення додатків. Менеджери та інші працівники, які використовують знання, перенавантажені інформацією. Тому, проблема полягає у впорядкуванні існуючої інформації та виявленні тієї, яка є найважливішою. Програмні агенти застосовуються, щоб допомогти менеджерам охопити великі масиви даних і інформації, які зберігаються в електронному вигляді. Програмний агент функціонує в СППР як фоновий, базовий процес, який застосовує низку логічних правил для того, щоб автоматично спостерігати за певною сукупністю даних, з метою пошуку зразка, що відповідає цим правилам, і інформувати зацікавлених користувачів, коли такі зразки виявляються. Цей вид агентів також називають «*програмним агентом-фільтром*» чи «*програмним агентом-спостерігачем*».

Програмні агенти є цінними інструментальними засобами для допомоги користувачам СППР та виконавчих інформаційних систем в аналізі великих баз даних на безперервній основі.

*Системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems — DSS)* належать до інформаційних систем нового покоління, головне призначення яких полягає в забезпеченні комп'ютерною підтримкою прийняття рішень зі слабоструктурованих та неструктурованих проблем організаційного управління на різних етапах підготовки рішень і моніторингу. У класичному розумінні СППР є інформаційною системою, котра має такі компоненти: інтерфейс користувача, систему керування базами даних (СКБД), систему керування базами моделей (СКБМ), систему керування повідомленнями (СКП), що з'явилася лише останніми роками.

*Виконавчі інформаційні системи* або інформаційні системи для керівників (*Executive Information System — EIS*) — це спеціалізовані СППР, що допомагають виконавцям аналізувати важливу інформацію і використовувати відповідні інструментальні засоби, щоб направляти її для створення стратегічних рішень у межах певної організації. Зокрема, EIS допомагають керівникам точніше розробляти актуальне цілісне зображення операцій своєї організації, а також конкурентів, постачальників та споживачів (замовників).

Системи підтримки прийняття рішень можуть бути корисними для розробки слабо структурованих рішень. Особливості таких рішень показано в таблиці 2. СППР дають можливість виробити правильне рішення в умовах невизначеності чи часткової невизначеності та браку інформації та знань.

Процес прийняття рішень в СППР полягає у трьох фазах.

**Перша фаза** дослідницька. На цій фазі досліджуються знання та інформація з внутрішніх та зовнішніх джерел. В процесі дослідження розуміння проблеми стає більш ясними і обґрунтованим, альтернативи і їх наслідки більш зрозумілими.

**Друга фаза** — проектування. На цьому етапі менеджер формулює знання про результати альтернативних дій оцінює їх наслідки для функціонування системи. На цьому етапі менеджер може виробляти додаткові знання.

**Третя фаза** — вибір рішення. На цьому етапі менеджер виконує вибір між альтернативами з урахуванням їх наслідків, які були проаналізовані і досліджені на першій і другій фазах.

Таблиця 2

#### Особливості розробки слабо структурованих рішень

Структуровані рішення	Неструктуровані рішення
Регулярні, повторювані рішення	Ненадійні, рідко повторювані рішення
Засновані на стабільних умовах	Засновані на випадкових і умовах, і даних
Альтернативи чіткі	Альтернативи неясні
Наслідки альтернатив визначені	Наслідки альтернатив невизначені
Критерії вибору чітко визначені	Критерії вибору неоднозначно визначені
Спеціальні знання відомі	Спеціальні знання, необхідні для прийняття рішень, невідомі
Необхідне знання легко доступне	Необхідне знання недоступне
Заздалегідь відомо повний набір кроків для досягнення рішення	В процесі прийняття рішень застосовуються нестандартне мислення, мозковий штурм, синтез, аналогія
Опора на традиції	Опора на розвідку, творчість, прозоріння, винахідливість

Прийняте рішення може бути застосовано не одразу, а через деякий час, який підтвердить



правильність прийнятого рішення. Всі три фази не завжди йдуть послідовно, вони можуть перекривати одна одну і процес прийняття рішення може бути ітеративним.

Структура систем підтримки прийняття рішень включає в себе наступні елементи

1. Лінгвістична система;
2. Система подання даних та інформації;
3. Система обробки задач;
4. Системи обробки задач конкретних предметних областей, системи знань.

На рис. 3 показана взаємодія елементів і структура системи підтримки прийняття рішень. В загальній архітектурі СППР ми бачимо важливі і фундаментальні аспекти, загальні для всіх систем підтримки прийняття рішень. Конкретна система підтримки прийняття рішень буде містити чотири вказаних елемента, але треба буде додатково сформулювати особливості цієї системи, які враховують вимоги, що висуваються до цієї системи.

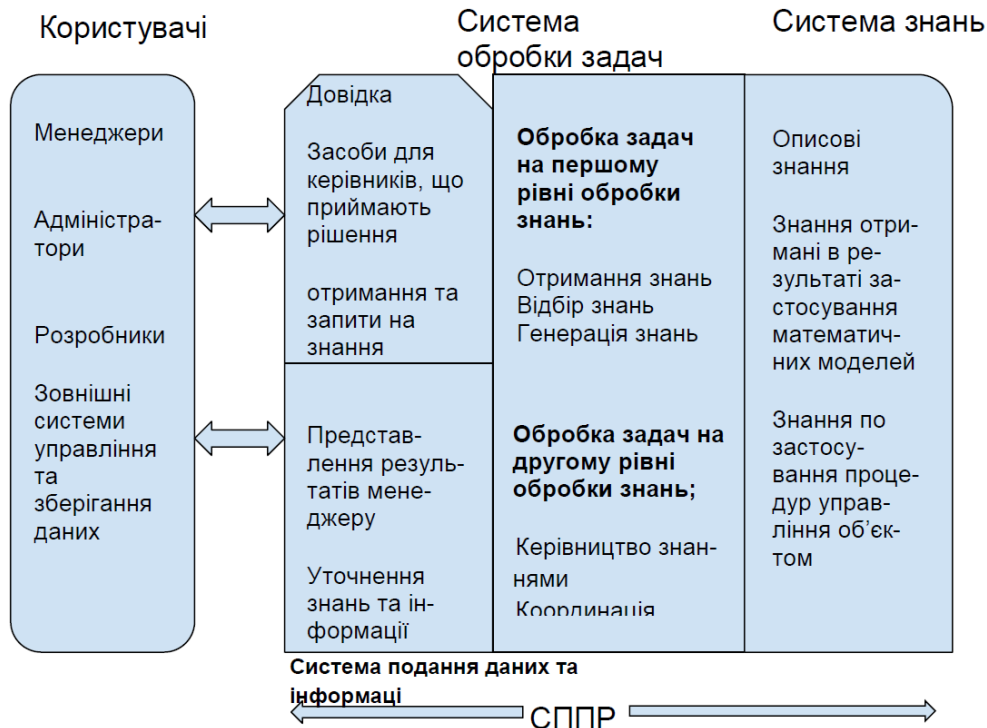


Рис. 3. Архітектура системи підтримки прийняття рішень

Для отримання науково обгрунтованих управлінських рішень системи підтримки прийняття рішень використовують математичні моделі. Серед них найбільш популярними у використанні є такі типи моделей: оптимізаційні, статистичного аналізу, прогнозні, нейромережіві.

Впровадження моделей в системах підтримки прийняття рішення містить наступні етапи [1, 4, 5]:

- Формалізація вихідної проблеми.
- Побудова математичної моделі.
- Розв'язання моделі.
- Перевірка адекватності моделі.
- Впровадження результатів розв'язку.

Формалізація проблеми представляє собою осмислення і формулювання в чіткій письмовій формі суті економічної чи організаційної проблеми. На цьому етапі мають бути визначені критерії, за якими буде виконуватися моделювання, а також має бути визначено економічний зміст критеріїв і обмежень задачі оптимізації або мета статистичного аналізу, критерії прогнозування та навчання моделей нейронних мереж.

Після того, як економічний зміст задачі чітко сформульовано переходять до етапу перекладу задачі на математичну мову, тобто побудову математичної моделі. Оптимізаційна модель містить критерій оптимізації який називається цільовою функцією та обмеження.

Критерій оптимізації – це показник ефективності функціонування системи управління. Цільова функція є математичним формулюванням критерія оптимізації. Цільова функція максимізується або мінімізується. На цільову функцію накладаються обмеження. Зазвичай вони формуються у вигляді нерівностей. Загальний вигляд математичної моделі може бути представлений наступним чином.

$$p = \min f_0(x), \text{ обмеження } f_i(x) \text{ } \forall i = 1, \dots, m$$

де  $x$  – змінна задачі оптимізації;  $f_0$  – цільова функція;  $f_i$  – обмеження;  $p$  – оптимальне значення цільової функції.

Методи розв'язку таких моделей показано на рис. 4 [1]. В системах підтримки прийняття рішень застосовується велика кількість економіко-математичних моделей. Важливим етапом в розробці моделей є

правильний вибір критеріїв оптимізації. Існує ряд методів лінійного, цілочислового, нелінійного програмування які дозволяють розв'язати широкий спектр задач. Нейромережеві моделі дозволяють побудувати системи зі штучним інтелектом які можуть навчатися. Апарат теорії ігор дозволяє змодельовати конфліктні ситуації, конкуренцію на ринку, знайти оптимальне рішення для розв'язання таких проблем.

В системах підтримки прийняття рішення широко застосовуються методи прогнозування. Найбільш ефективними з точки зору точності прогнозу є методи короткострокового і середньострокового прогнозування. Для прогнозування часових рядів у яких спостерігається тренд є доцільним використовувати прогнозування із використанням регресійних моделей. Для стаціонарних процесів доцільно застосовувати метод статистичної екстраполяції або ковзного середнього чи експоненційного згладжування. Для приведення нестационарних процесів до стаціонарного вигляду існує ряд ефективних методів.

Ефективне прогнозування передбачає наявність у користувача СППР фахового володіння математичним апаратом методів прогнозу та досвіду застосування моделей.

**Висновки.** Метою застосування систем підтримки прийняття рішень є підвищення можливості і здібності менеджера для прийняття правильних і науково обґрунтованих рішень. Основними типами систем, які використовуються, є текстові СППР, гіпертекстові СППР, орієнтовані на використання баз даних та сховищ даних СППР, табличні СППР, орієнтовані на моделі СППР, СППР, які використовують штучний інтелект, гібридні СППР. Ці системи відрізняються можливостями які дозволяють користувачам отримувати інформацію або знання з інформаційної системи яка була запрограмована і налаштована користувачем так, щоб врахувати досвід користувача і його підприємства, а також можливості математичних моделей та сховищ даних, які поліпшують якість прийняття рішень. Подальший розвиток інформаційних систем призводить до побудови обчислювальних середовищ, які включають в себе електронну комерцію, нові можливості аналітики, можливості колективної співпраці, проектування, розробку нової продукції.

## Література

1. Демиденко М.А. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посібн. / Демиденко М.А. – Дніпропетровськ : НГУ, 2016. – 104 с.
2. Демиденко М.А. Управління проектами інформатизації : навч. посібн. / Демиденко М.А. – Дніпропетровськ : НГУ, 2014. – 118 с.
3. Корнеев В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / Корнеев В.В. – М. : Нолидж, 2000. – 352 с.
4. Ситник В.Ф. Основи інформаційних систем : навч. посіб. / Ситник В.Ф. – Вид. 2-е, перероб. і доп. – К. : КНЕУ, 2001. – 420 с.
5. Спирли Э. Корпоративные хранилища данных. Планирование, разработка, реализация. Том. 1 / Спирли Э. ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2001. – 400 с.

## References

1. Demidenko M.A. Support Systems of Making Decisions. Teaching manual. Dnipropetrovsk: NMU, 2016. 104 p.
2. Demidenko M.A. Information projects management. Teaching. Manual. Dnipropetrovsk: NMU, 2014. 118 p.
3. Korneev V.V. and other databases. Intelligent processing of information. M.: Holidge, 2000. 352 p.
4. Sitnik V.F. and others. Fundamentals of Information Systems: Teaching. Manual. Kind. 2nd, processing and add. K.: KNEU, 2001. 420 p.
5. Spirli E. Corporate data warehouses. Planning, development, implementation. Volume. 1. Transl. from English. M.: Williams, 2001. 400 p.

Рецензія/Peer review : 21.10.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатиї Р.В.

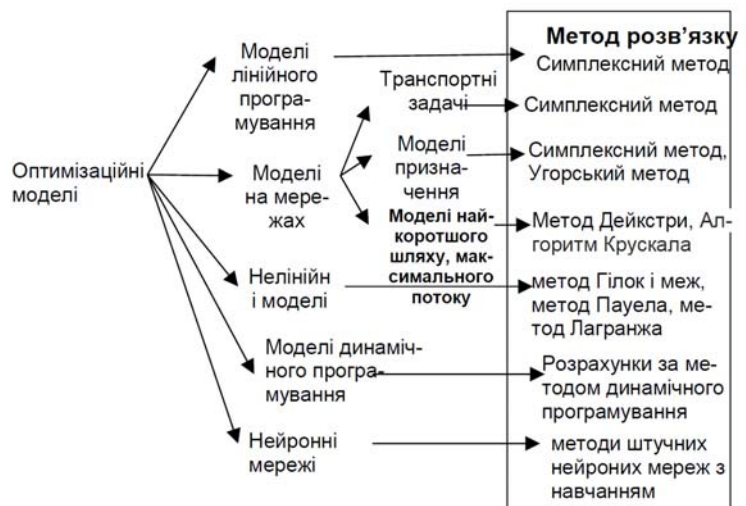


Рис. 4. Моделі в задачах СППР та методи їх математичного розв'язку

О.Є. РУБАНЕНКО, Є.А. БОНДАРЕНКО, І.О. ГУНЬКО, А.М. КОВАЛЬ  
Вінницький національний технічний університет

## ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

В статті досліджуються перехідні процеси під час увімкнення-вимкнення електричного обладнання розподільних міських електричних мереж, наприклад фотовольтаїчних електричних станцій (ФЕС), в локальних електричних системах. Наведені результати досліджень впливу ФЕС з інверторами PCS-9563 та RC фільтрами, що містять в кожній фазі конденсатор ємністю 300 мкФ та котушку індуктивністю 0,1 мГн, на струми в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги та доведено, що під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів ФЕС, можуть зростати струми в обмотках високої напруги цих трансформаторів, а у кабельних муфт може збільшуватись струм через опір ізоляції. Аналіз результатів застосування швидкого перетворення Фур'є під час дослідження графіку зміни струму в високовольтній обмотці свідчить про те, що в струмі цієї обмотки серед найбільш впливових на графік присутня не лише гармоніка промислової частоти 50 Гц, а й інші гармоніки, наприклад, гармоніки з частотами 150, 300 та 450 Гц. Такі перенапруги можуть викликати спрацьовування розрядників та зменшення їх комутаційного ресурсу. Показано, що використання методів математичного моделювання, методів теорії електричних кіл та програмного пакету Wolfram Mathematica дозволяє отримати математичні моделі процесів зміни струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з розподіленими джерелами енергії (РДЕ). Звертається увага на те, що складність математичних виразів струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ, отриманих з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica, погіршує їх сприйняття, розуміння та аналіз, тому доцільнішим є використання в дослідженнях комп'ютерних моделей, створених в програмному забезпеченні PS CAD, Matlab Simulink і т. н.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, відновлювані джерела енергії, пошкоджуваність електричного обладнання, трансформатор напруги, кабельна лінія, операторний метод розрахунку.

A. RUBANENKO, E. BONDARENKO, I. HUNKO, A. KOVAL  
Vinnytsia National Technical University

## INFLUENCE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY ON THE TECHNICAL CONDITION OF EQUIPMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS

The transient processes has been researched in the article during the switching on and switching-off of electrical equipment (EE), for instance, of photovoltaic power plants (PPP), in the local electrical systems (LES). Were shown results of PPP impact studies with inverters PCS-9563 and RC filters, which are contained in each phase are capacitor with a capacity of 300  $\mu$ F and an inductor of 0,1 mH, on the currents in the high voltage winding of measuring transformers of voltage, and it is proved that during switching overvoltage, caused by the switching ON or OFF of several PPP inverters, the currents in high voltage windings of these transformers may grow, while in the cable couplings can increase the current due to insulation resistance. The analysis of the results of using the fast transform of Fourier during the study of the curve of change of current in a high-voltage winding indicates that in the current of this winding, among the most of influential on the graph, there are not only harmonics of an industrial frequency of 50 Hz, but also other harmonics, for example, harmonics, with frequencies 150, 300 and 450 Hz. Such overvoltages can cause operations of arresters and reduce their switching resources. It is shown that the use of methods of mathematical modelling, methods of the theory of electric circuits and software package of Wolfram Mathematica allows to obtain mathematical models of processes of change of currents and voltages in the equipment of local electrical systems with renewable sources of energy (RSE). Attention is drawn to the fact that the complexity of mathematical expressions of currents and voltages in the equipment of local electrical systems with RSE, which have been obtained using the software package of Wolfram Mathematica worsens their perception and understanding and their analysis, therefore, more expedient using the research computer models created in the software providing by PS CAD, Matlab Simulink, etc.

Key words: distribution electric networks, renewable energy sources, damage to electrical equipment, voltage transformer, cable line, operator calculation method.

### Вступ

Ознакою сьогодення є все ширше використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1, 5], які розглядаються як один із найбільш перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення. Часто такі риси ВДЕ, як екологічна чистота та невичерпна ресурсна база, стають визначальними їх перевагами в умовах зростаючих темпів забруднення довкілля та швидкого зменшення ресурсів органічного палива.

Забезпечення енергетичної незалежності та вступ України до Євросоюзу – два найважливіших стратегічних завдання розвитку сучасної України. Одна з умов успішного вирішення обох завдань – максимальне збільшення в стратегічному балансі частки енергії, виробленої за рахунок власних енергетичних ресурсів, серед яких і використання ВДЕ, таких, наприклад, як сонячні електричні станції (СЕС) [5]. Україна має великий потенціал різних ВДЕ.

Використання ВДЕ у відповідності до потреб в електроенергії привертає увагу з точки зору вирішення проблеми дефіциту електричної енергії, особливо для споживачів, надійність електропостачання яких потребує покращення, наприклад, розташованих у віддалених та важкодоступних районах [12, 14].

Також відомо, що в Україні існують проблеми зумовлені використанням традиційних джерел

енергії. Причинами цього є застарілі технології виробництва та експлуатації, вичерпання ресурсу електричного обладнання (ЕО) підприємств електроенергетичної галузі, що разом з низькою ефективністю використання палива призводить до значних обсягів шкідливих викидів. Втрати електричної енергії під час транспортування, розподілу та використання електроенергії і тепла, а також монопольна залежність енергетичної галузі від імпорту енергоносіїв, ще більш ускладнюють ситуацію на енергетичному ринку України. Проте, збільшення обсягів генерування розподіленими джерелами енергії (РДЕ) без врахування особливостей їх роботи в електричних мережах може призводити до погіршення якості електричної енергії [1, 15] та потребує оцінювання надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією [17].

#### Мета і задачі роботи

За таких умов метою досліджень є аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на технічний стан ЕО. Відповідно до мети автори розв'язували наступні задачі: дослідити струми в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги, гармонійні складові у напругах 6–35 кВ особливо під час під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів фотовольтаїчних електричних станцій (ФЕС) [18]; проаналізувати струми через опір ізоляції кабельних муфт, зумовлені появою в фазних напругах гармонійних складових значення перенапруг та можливість спрацьовування розрядників під час увімкнення та вимкнення РДЕ; дослідити доцільність використання методів математичного моделювання, а саме програмного пакету Wolfram Mathematica та програмного забезпечення PS CAD для дослідження процесів в ЕО ЛЕС.

#### Аналіз попередніх досліджень

Так в роботі [3] звертається увага на пошкоджуваність високовольтних силових трансформаторів з причини погіршення технічного стану високовольтних вводів. Експлуатація трансформаторів та оптимальне керування їх РПН ускладнюються в умовах, коли трансформатор відпрацював понад 25 років використав свій паспортний ресурс. Враховуючи пошкоджуваність високовольтних вводів, в статті [3] стверджується те, що оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем (ЕЕС) може бути забезпечено підвищенням надійності високовольтних вводів. Дослідженням показників якості електричної енергії в ЛЕС присвячені роботи як багатьох вітчизняних, так й іноземних вчених [6]. Всі вони акцентують увагу на тому, що напруга у вузлах ЛЕС під час експлуатації може бути меншою або більшою граничних допустимих значень. Гармонійні складові струмів і напруг в розподільних електричних мережах можуть мати понад нормовані відхилення.

Однак більшість вітчизняних дослідників розглядає ФЕС як джерела електричної енергії, що генерується з метою продажу її в ДП «Енергоринок» [4, 18]. Тому, з метою зменшення втрат електричної потужності під час транспортування електроенергії генерованої ФЕС, в дослідженнях розглядаються розподільні електричні мережі 6+10 кВ [2]. Водночас, іноземні дослідники додатково розглядають і мережі 0,4 кВ, в яких ФЕС, в першу чергу, задовольняють потреби в електроенергії їх власників, і лише надлишок електроенергії передається від ФЕС в ЛЕС та часто споживається найближчими до ФЕС споживачами. За таких умов декілька інверторів ФЕС різних власників можуть бути приєднані до однієї ЛЕС в різних вузлах 0,4 кВ.

Враховуючи складність проведення досліджень показників якості електричної енергії в ЛЕС з декількома різнотипними РДЕ, що зумовлено відсутністю декількох РДЕ в одній ЛЕС, пропонуємо здійснити такі дослідження з використанням математичних та комп'ютерних моделей.

Результати досліджень, свідчать про те, що, поряд з іншими, в ЛЕС часто пошкоджуються вимірювальні трансформатори напруги 6–10 кВ, кабельні муфти, розрядники, тощо. В оглядах відмов [3] згадуються пошкодження трансформаторів напруги, електродвигунів, комплектних розподільних пристроїв зовнішньої установки (КРУН), нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) і вентиляльних розрядників. Однією з причин таких пошкоджень можуть бути внутрішні перенапруги.

Також відомо те, що в електричних мережах 3–35 кВ з ізолюваною нейтраллю відбуваються перехідні процеси, які негативно позначаються на роботі вимірювальних трансформаторів напруги (ТН). Саме з цієї причини середній термін служби ТН в деяких випадках не перевищує 3–5 років для таких класів напруг. До цих перехідних процесів можна віднести процеси під час: ферорезонансних перенапруг; комутаційних перенапруг; зміщення нейтралі; наявності постійної складової магнітного потоку в ТН при автоколивальних процесах в мережі.

В [3] зазначається те, що непоодинокі пошкодження ЕО в мережах з ізолюваною нейтраллю (6+35 кВ) викликані ферорезонансом тому, що це явище викликає перенапруги або надструми, на вплив яких обладнання не розраховане і від яких воно не завжди якісно захищене.

Крім того, ферорезонанс виникає частіше, ніж інші види впливів. Він особливо небезпечний тим, що може існувати тривалий час.

Феромагнітними елементами в електричних мережах є силові трансформатори, дугогасильні реактори, вимірювальні трансформатори струму і напруги, електродвигуни, тобто все апарати, в яких є котушка з феромагнітним (сталевим) осердям. Особливістю котушки з феромагнітним сердечником є нелінійна залежність струму від напруги (потoku). У звичайних умовах в такому колі немає умов для збудження резонансу, тобто незатухаючих коливань.

Однак, при впливах на феромагнітний елемент, що призводять до насичення сердечника, відбувається плавна зміна індуктивності цього елемента, що створює можливість виникнення резонансу між

індуктивністю і ємністю.

Підставою для такого висновку є відсутність компенсуючих пристроїв у мережі, де необхідна їх експлуатація згідно з вимогами Правил технічної експлуатації, за наявності дугового замикання або просто будь-якого однофазного замикання на «землю» на початковій стадії розвитку пошкодження. Настільки спрощений підхід не дозволяє виявити справжні причини пошкоджень ЕО, а отже, розробити ефективні заходи щодо запобігання подібним випадкам. У ряді випадків пошкодження електричного обладнання пояснюють внутрішніми перенапругами в умовах, коли взагалі неможливо їх виникнення, наприклад, коли події починаються з міжфазного короткого замикання (КЗ). Однак, розвиток таких пошкоджень супроводжується перекриттям великих повітряних проміжків. Розглядаються пошкодження не тільки в комплектних розподільних пристроїв, де всі ізоляційні проміжки скорочені, а й пошкодження в закритому розподільному устаткуванні звичайного виконання з досить великими ізоляційними відстанями, що створює враження впливу перенапруг великої кратності. Насправді перекриття таких великих повітряних проміжків викликано впливом струму міжфазного КЗ, наприклад, на дефектні контактні з'єднання.

Отже необхідно боротися з причинами пошкодження ЕО міських [8] та сільських [9] електричних мереж, ЕО електротехнічних мереж систем електропостачання споживачів [7, 10], а не з наслідками. Такими причинами, серед багатьох інших, можуть бути перехідні процеси під час увімкнення – вимкнення ЕО розподільних міських електричних мереж, наприклад, ФЕС в ЛЕС.

В роботах [11–13, 15] доведено, що в розподільних електричних мережах, наприклад, 10 кВ виникають перенапруги. За певних умов в цих мережах під час резонансу струмів протікають надструми.

Отже доцільним є розглянути можливість, наприклад, інверторів ФЕС впливати на таку зміну параметрів розподільної мережі, за якої у вузлах мережі виникають перенапруги, а у вітках – протікають надструми.

В умовах експлуатації застарілого ЕО розподільних електричних мереж ЛЕС варто очікувати зростання його пошкоджуваності. В роботах різних авторів зазначається, що під час експлуатації таких РДЕ, як ФЕС [18], мають місце тимчасові погіршення показників якості електричної енергії [16], які також здатні викликати пошкодження ЕО.

#### Матеріали та методи дослідження.

Розглянемо моделі розподільних електричних мереж з пошкоджуваним високовольтним ЕО. В якості прикладу дослідимо вплив гармонійних складових напруги технічний стан високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та муфт кабельних ліній.

Відомо, що кабельні лінії (КЛ) мають більшу ємність ізоляції ніж повітряні лінії електропередач. Велика ємність ізоляції особливо у кабельних муфт.

Для КЛ 10 кВ з ємністю в 0,0016 мкФ при збільшенні частоти до 300 Гц, струм в ізоляції КЛ становитиме 10,56 А, при гранично допустимому значенні – 300 мкА, а отже це може призвести до передчасного пошкодження ізоляції КЛ.

Результати досліджень свідчать про те, що зростання частоти (порядку) гармонійних складових в напрузі фаз кабельних ліній, викликає збільшення сили струму, що протікає через ізоляцію КЛ.

В якості РДЕ розглянемо ФЕС з інверторами PCS-9563, які використовуються на ФЕС, що приєднані до мереж ПАТ «Вінницяобленерго».

З метою зменшення впливу вищих гармонік у вихідних колах інверторів можуть бути встановлені RC фільтри: в кожній фазі – конденсатор ємністю 300 мкФ та котушка індуктивністю 0,1 мГн, розрахована на робочий струм  $I_{роб} = 917$  А (потужність інвертора 500 кВт).

Розглянемо процеси зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги та напруги на первинній обмотці цього трансформатора. Для цього на рис. 1 наведена заступна схема однієї фази мережі 10 кВ з приєднаними до неї RC фільтром інвертора ФЕС, джерелом змінної напруги (ФЕС), джерелом напруги у центрі живлення розподільної мережі, однофазним трансформатором напруги та лініями електропередач.

На заступній схемі мережі з РДЕ (рис. 1) показані: активний опір  $R_1$  та індуктивність  $L_1$  силового трансформатора 110/10 кВ приведені до шин 10 кВ до яких приєднаний вимірювальний трансформатор напруги 10 кВ. Активний опір  $R_2$  та індуктивність  $L_2$  – параметри обмотки високої напруги вимірювального трансформатора напруги, активний опір  $R_3$  та індуктивність  $L_3$  – параметри вітки намагнічування на заступній схемі вимірювального трансформатора напруги, активний опір  $R_4$  та індуктивність  $L_4$  – параметри вторинної обмотки разом з опором навантаження на заступній схемі вимірювального трансформатора напруги, активний опір  $R_5$ , ємність  $C_6$  відносно землі та індуктивність  $L_5$  лінії електропередач від шин підстанції до якої приєднаний трансформатор напруги до шин підстанції до якої приєднаний силовий трансформатор 10/0,4 кВ. Параметри заступної схеми цього трансформатора представлені активним опором  $R_7$  та індуктивністю  $L_7$  – обмотки високої напруги цього трансформатора, активним опором  $R_8$  та індуктивністю  $L_8$  – параметрами вітки намагнічування на заступній схемі трансформатора, активним опором  $R_9$  та індуктивністю  $L_9$  – обмотки низької напруги приведені до високовольтної сторони. Також на схемі показані активний опір  $C_{10}$  та індуктивність  $L_{11}$  – параметри фільтра інвертора ФЕС. Активний опір фільтра не враховується тому, що його значення значно менше ніж індуктивний опір дроселя  $L_{11}$ .  $U_1$  та  $U_2$  – напруги джерел електрорушійних сил (ЕРС) центра живлення та ФЕС (ці параметри приведені до сторони 10 кВ).

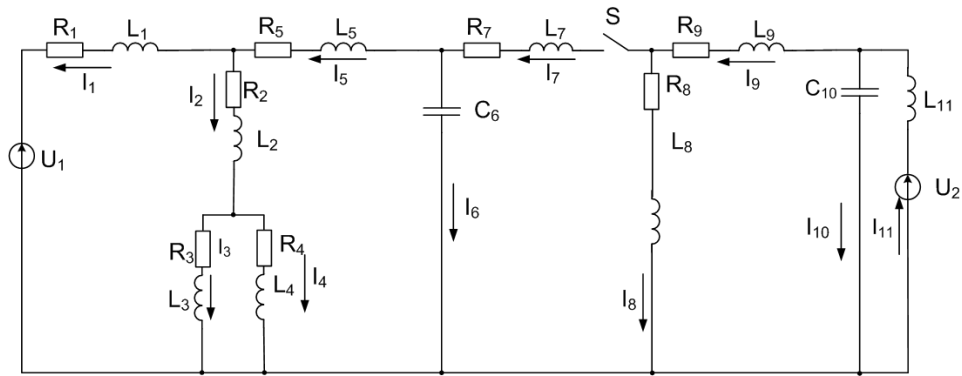


Рис. 1. Заступна схема мережі з РДЕ

Для схеми, наведеної на рис. 1, надаємо схему в операторній формі (рис. 2), враховуючи незалежні початкові умови.

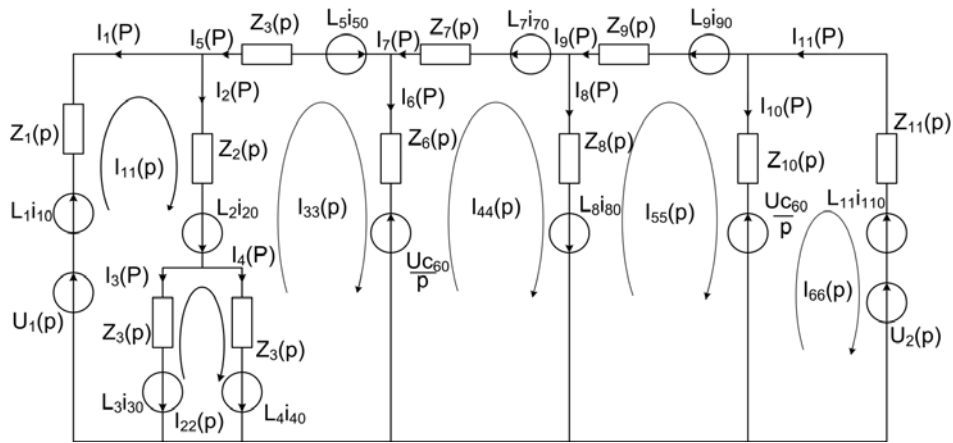


Рис. 2. Розрахункова схема в операторній формі запису

Розглянемо режим увімкнення ключа S в момент часу  $t=0$  секунд, у який крива напруг  $u_1(t)=u_2(t)=U_m \cdot \sin(\omega t)$  переходить через 0. В такому випадку незалежна початкова умова є дійсним числом, яке є результатом множення уявної частини комплексного числа відповідного струму (чи відповідної напруги) на  $\sqrt{2}$ .

Наприклад, миттєве значення струму:

$$i_1(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \psi_{i1}), \tag{1}$$

де  $I_1$  – діюче значення струму;  $\psi_{i1}$  – початкова фаза цього струму.

В момент часу  $t = 0_+$ :

$$i_1(0_+) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\psi_{i1}) = \text{Im}(I_1) \cdot \sqrt{2}. \tag{2}$$

З метою спрощення розрахунків в заступній схемі не враховані нелінійні властивості кіл параметрів трансформаторів, які враховані в роботах [4, 15], що викликає похибку в кількісних результатах математичного моделювання, однак дозволяє здійснювати якісний аналіз процесів в досліджуваних колах заступної та розрахункової схем.

Незалежні початкові умови визначаються з розрахунку усталеного режиму роботи схеми до комутації, виконаного символічним методом, а саме: струми в індуктивностях  $L_1 \div L_5, L_7 \div L_9$ , напруги на ємностях  $C_6 \div C_{10}$ .

З метою дослідження змін струму в обмотці високої напруги вимірювального трансформатора напруги перехідного процесу, який виникає під час підключення ФЕС до мережі ЛЕС розрахунок виконуємо методом контурних струмів в операторній формі відповідно до схеми, показаної на рис. 2.

Джерела ЕРС  $U_1(s)$  та  $U_2(s)$  це операторні зображення синусоїдних функцій  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$ :

$$U_1(s) = [U_{m1} \cdot \omega] / (s^2 + \omega^2) \text{ та } U_2(s) = [U_{m2} \cdot \omega] / (s^2 + \omega^2).$$

Система рівнянь в операторній формі:

$$\begin{cases}
 I_{11} \cdot ((L_1 \cdot s + R_1) + (L_2 \cdot s + R_2) + (L_3 \cdot s + R_3)) - I_{22} \cdot (L_3 \cdot s + R_3) - I_{33} \cdot (L_2 \cdot s + R_2) = \\
 = U_1 + L_1 \cdot I_{10} + L_2 \cdot I_{20} + L_3 \cdot I_{30} \\
 I_{22} \cdot ((L_3 \cdot s + R_3) + (L_4 \cdot s + R_4)) - I_{11} \cdot (L_3 \cdot s + R_3) - I_{33} \cdot (L_4 \cdot s + R_4) = L_4 \cdot I_{40} - L_3 \cdot I_{30} \\
 I_{33} \cdot ((L_2 \cdot s + R_2) + (1/(C_6 \cdot s))) + (L_4 \cdot s + R_4) + (L_5 \cdot s + R_5)) - I_{11} \cdot (L_2 \cdot s + R_2) - \\
 - I_{22} \cdot (L_4 \cdot s + R_4) - I_{44} \cdot (1/(C_6 \cdot s)) = -L_4 \cdot I_{40} - L_2 \cdot I_{20} + L_5 \cdot I_{50} - (U_{C6}/s) \\
 I_{44} \cdot ((1/(C_6 \cdot s)) + (L_7 \cdot s + R_7) + (L_8 \cdot s + R_8)) - I_{33} \cdot (1/(C_6 \cdot s)) - I_{44} \cdot (L_8 \cdot s + R_8) = \\
 = (U_{C6}/s) \cdot L_7 \cdot I_{70} + L_8 \cdot I_{80} \\
 I_{55} \cdot ((L_8 \cdot s + R_8) + (L_9 \cdot s + R_9) + (1/(C_{10} \cdot s))) - I_{44} \cdot (L_8 \cdot s + R_8) - I_{66} \cdot (1/(C_{10} \cdot s)) = \\
 = -(U_{C10}/s) \cdot L_8 \cdot I_{80} - L_9 \cdot I_{90} \\
 I_{66} \cdot ((1/(C_{10} \cdot s)) + (L_{11} \cdot s)) - I_{55} \cdot (1/(C_{10} \cdot s)) = (U_{C10}/s) \cdot L_{11} \cdot I_{110} - U_2
 \end{cases} \tag{3}$$

де  $s$  – оператор Лапласа.

Результатом розв'язування системи рівнянь (3) з використанням пакету Wolfram Mathematica, є контурні струми, які в операторній формі запису мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 I_{11}(s) = & -((-R_4 - L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_{62} \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + \\
 & + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) - (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot \\
 & \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \\
 & \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + \\
 & (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{22}(s) = & -(I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) / ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) + ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot (-(-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (- \\
 & - (I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1)) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \\
 & \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot \\
 & U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (- \\
 & - R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (- \\
 & - 1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{33} = & -(I_{10} \cdot L_1 \cdot R_3 + I_{20} \cdot L_2 \cdot R_3 + I_{40} \cdot L_4 \cdot R_3 + I_{10} \cdot L_1 \cdot R_4 + I_{20} \cdot L_2 \cdot R_4 + I_{30} \cdot L_3 \cdot R_4 + I_{10} \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot s + I_{20} \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot s + I_{10} \cdot L_1 \cdot L_4 \cdot s + I_{20} \cdot L_2 \cdot \\
 & \cdot L_4 \cdot s + I_{30} \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot s + I_{40} \cdot L_4 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot s + R_3 \cdot U_1 + R_4 \cdot U_1 + L_3 \cdot s \cdot U_1 + L_4 \cdot s \cdot U_1) / (R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + L_3 \cdot R_2 \cdot s + L_4 \cdot R_2 \cdot s + L_2 \cdot R_3 \cdot s + L_4 \cdot R_3 \cdot s + \\
 & + L_1 \cdot R_4 \cdot s + L_3 \cdot R_4 \cdot s + L_2 \cdot L_3 \cdot s^2 + L_2 \cdot L_4 \cdot s^2 + L_3 \cdot L_4 \cdot s^2) + (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) / (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot \\
 & \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) / ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s))) \cdot (- \\
 & - ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) \\
 & \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) + (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot \\
 & \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot \\
 & (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{44} = & -(I_{30} \cdot L_3 + I_{40} \cdot L_4) / (C_6 \cdot s \cdot (R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) + ((-R_3 \cdot R_4 \cdot L_3 \cdot s \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1)) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot \\
 & \cdot s + L_4 \cdot s)) - (C_6 \cdot (I_{70} \cdot L_7 \cdot s \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot s \cdot U_{C6})) / (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) + ((R_3 + L_3 \cdot s) / (R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2)) - ((-R_3 \cdot R_4 \cdot L_3 \cdot s \cdot \\
 & \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) / (R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot \\
 & \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-(-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + \\
 & + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot \\
 & - I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1) + ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot \\
 & \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s)) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot ((I_{70} \cdot L_7 \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot U_{C6}/s)/(C_6 \cdot s) + (R_7 + 1/(C_6 \cdot \\
 & \cdot s) + L_7 \cdot s) \cdot (I_{20} \cdot L_2 + I_{40} \cdot L_4 \cdot I_{50} \cdot L_5 + U_{C6}/s))) / (((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot \\
 & - L_4 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + \\
 & + L_7 \cdot s))) - (-(-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot (-R_3 \cdot L_3 \cdot s) + (R_1 + R_2 + R_3 + L_1 \cdot s + L_2 \cdot s + L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s)) \cdot ((-R_4 \cdot L_4 \cdot s)^2 \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s) - \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (-1/(C_6^2 \cdot s^2)) + (R_2 + R_4 + R_5 + 1/(C_6 \cdot s) + L_2 \cdot s + L_4 \cdot s + L_5 \cdot s) \cdot (R_7 + 1/(C_6 \cdot s) + L_7 \cdot s))); \\
 I_{55} = & -(I_{30} \cdot L_3 + I_{40} \cdot L_4) \cdot (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot (1 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s^2) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot \\
 & (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3)) - ((R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s) \cdot (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot \\
 & (1 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s^2) \cdot (-I_{30} \cdot L_3 \cdot I_{40} \cdot L_4) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) + (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-I_{10} \cdot L_1 \cdot I_{20} \cdot L_2 \cdot I_{30} \cdot L_3 \cdot U_1)) / ((R_4 + L_4 \cdot s) \cdot (1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot \\
 & \cdot (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3) \cdot ((-R_3 \cdot L_3 \cdot s) \cdot (-R_4 \cdot L_4 \cdot s) \cdot (-R_2 \cdot L_2 \cdot s) \cdot \\
 & (R_3 + R_4 + L_3 \cdot s + L_4 \cdot s)) - (I_{11} \cdot L_{11} + I_{80} \cdot L_8 + I_{90} \cdot L_9 + C_{10} \cdot I_{80} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot I_{90} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^2 + U_2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot s \cdot U_{C10}) / (R_8 + R_9 + L_{11} \cdot s + L_8 \cdot s + L_9 \\
 & + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_8 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot R_9 \cdot s^2 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_8 \cdot s^3 + C_{10} \cdot L_{11} \cdot L_9 \cdot s^3) + (C_6 \cdot (1/(C_{10} \cdot s) + L_{11} \cdot s) \cdot (-R_8 \cdot L_8 \cdot s) \cdot (I_{70} \cdot L_7 \cdot s \cdot I_{80} \cdot L_8 \cdot s \cdot \\
 & - U_{C6})) / ((1 + C_6 \cdot R_7 \cdot s + C_6 \cdot L_7 \cdot s^2) \cdot (-1/(C_{10} \cdot s^2)) + (1/(C_{10} \cdot s) + L_{11} \cdot s) \cdot (R_8 + R_9 + 1/(C_{10} \cdot s) + L_8 \cdot s + L_9 \cdot s)) - (R_8 + L_8 \cdot s) \cdot (1 + C_{10} \cdot L_{11} \\
 & \cdot s^2) \cdot (R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + L_3 \cdot R_1 \cdot s + L_4 \cdot R_1 \cdot s + L_3 \cdot R_2 \cdot s + L_4 \cdot R_2 \cdot s + L_1 \cdot R_3 \cdot s + L_2 \cdot R_3 \cdot s + L_4 \cdot R_3 \cdot s + L_1 \cdot R_4 \cdot s + L_2 \cdot R_4 \cdot s + L_3 \cdot R_4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & s+L_1 L_3 s^2+L_2 L_3 s^2+L_1 L_4 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} \\
 & L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \\
 & (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s))))/((R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 \\
 & s^2+L_3 L_4 s^2) (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot \\
 & (((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (- \\
 & 1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) \cdot + (R_1+R_2+R_3+L_1 \\
 & s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+ \\
 & 1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))); \\
 & I_{66} = ((-I_{30} L_3+I_{40} L_4) \cdot (-R_8-L_8 s)) / ((R_4+L_4 s) (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} \\
 & R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) - ((R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (R_8+L_8 s) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1- \\
 & I_{20} L_2-I_{30} L_3-U_1)) / ((R_4+L_4 s) \cdot (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+ \\
 & C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) - (C_{10} (I_{110} L_{11} s+U_2-U_{c10})) / \\
 & (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (I_{110} L_{11} s+I_{80} L_8+I_{90} L_9+C_{10} I_{80} L_{11} L_8 s^2+C_{10} I_{90} L_{11} L_9 s^2+U_2+C_{10} L_{11} s U_{c10}) / (C_{10} s (1/(C_{10} s)+L_{11} s) \cdot \\
 & (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) + (C_6 (-R_8-L_8 s) \cdot (I_{70} L_7 s-I_{80} L_8 s - \\
 & U_{c6})) / ((1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3)) - ((R_8+L_8 \\
 & s) \cdot (R_1 R_3+R_2 R_3+R_1 R_4+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_1 s+L_4 R_1 s+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_1 R_3 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_1 R_4 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 \\
 & s+L_1 L_3 s^2+L_2 L_3 s^2+L_1 L_4 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} \\
 & L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 \\
 & s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} \\
 & L_5+U_{c6}/s)))) / ((R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2) \cdot \\
 & (1+C_6 R_7 s+C_6 L_7 s^2) \cdot (R_8+R_9+L_{11} s+L_8 s+L_9 s+C_{10} L_{11} R_8 s^2+C_{10} L_{11} R_9 s^2+C_{10} L_{11} L_8 s^3+C_{10} L_{11} L_9 s^3) \cdot (((-R_3-L_3 s) \cdot (- \\
 & R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + \\
 & (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4- \\
 & L_4 s)) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 \\
 & s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))).
 \end{aligned}$$

З використанням пакету Wolfram Mathematica визначаємо струм у первинній обмотці трансформатора напруги в операторній формі запису:

$$\begin{aligned}
 I_2(s) &= I_{11}(s) - I_{33}(s); \tag{4} \\
 I_2(s) &= I_{11}(s) = -((-R_4 - L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s) + L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot \\
 & (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} L_3-U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \\
 & \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-((I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot \\
 & ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s) + (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s)))) / (((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 \\
 & s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 \\
 & s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)))) - (I_{10} L_1 R_3+I_{20} L_2 \\
 & R_3+I_{40} L_4 R_3+I_{10} L_1 R_4+I_{20} L_2 R_4+I_{30} L_3 R_4+I_{10} L_1 L_3 s+I_{20} L_2 L_3 s+I_{10} L_1 L_4 s+I_{20} L_2 L_4 s+I_{30} L_3 L_4 s+I_{40} L_3 L_4 s+R_3 U_1+R_4 \\
 & U_1+L_3 s U_1+L_4 s U_1)/(R_2 R_3+R_2 R_4+R_3 R_4+L_3 R_2 s+L_4 R_2 s+L_2 R_3 s+L_4 R_3 s+L_2 R_4 s+L_3 R_4 s+L_2 L_3 s^2+L_2 L_4 s^2+L_3 L_4 s^2)+((( - \\
 & R_3-L_3 s)/(-R_4-L_4 s) - ((R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-R_2-L_2 s) - (R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)))/((-R_4-L_4 s) \cdot ((-R_3-L_3 s) \cdot \\
 & (-R_4-L_4 s) \cdot (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s))) \cdot (-((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 \\
 & s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-R_2-L_2 s) + (-R_4-L_4 s) \cdot (-I_{10} L_1-I_{20} L_2-I_{30} L_3- \\
 & U_1)) + ((-R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot (-I_{30} L_3-I_{40} L_4) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot \\
 & (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s)) + (-R_4-L_4 s) \cdot ((I_{70} L_7-I_{80} L_8-U_{c6}/s)/(C_6 s)+(R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) \cdot (I_{20} L_2+I_{40} L_4-I_{50} L_5+U_{c6}/s))))/((( -R_3-L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s) - (-R_2-L_2 s) \cdot \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s)) \cdot ((-R_2-L_2 s) \cdot (-R_4-L_4 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - (-R_3-L_3 s) \cdot (1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot \\
 & (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))) - (-R_2-L_2 s) \cdot (-R_3-L_3 s) + (R_1+R_2+R_3+L_1 s+L_2 s+L_3 s) \cdot (-R_4-L_4 s)) \cdot ((-R_4-L_4 s)^2 \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s) - \\
 & (R_3+R_4+L_3 s+L_4 s) \cdot (-1/(C_6^2 s^2)) + (R_2+R_4+R_5+1/(C_6 s)+L_2 s+L_4 s+L_5 s) \cdot (R_7+1/(C_6 s)+L_7 s))))).
 \end{aligned}$$

Звертаючи увагу на складність отриманих рівнянь, подальші розрахунки здійснюємо з урахуванням параметрів схеми:

активні опори у вітках схеми:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 2.52 \text{ Ом}; R_2 = 1800 \text{ Ом}; R_3 = 3420 \text{ Ом}; R_4 = 207000 \text{ Ом}; R_5 = 1.26 \text{ Ом}; R_7 = 1.28 \text{ Ом}; R_8 = 7482 \text{ Ом}; \\
 R_9 &= 3.28 \text{ Ом};
 \end{aligned}$$

індуктивності у вітках схеми:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 0.0736 \text{ Ом}; L_2 = 10.032 \text{ Гн}; L_3 = 56.70 \text{ Гн}; L_4 = 10.032 \text{ Гн}; L_5 = 0.00 \text{ Гн}; L_7 = 0.001 \text{ Гн}; L_8 = 23.83 \text{ Гн}; \\
 L_9 &= 0.01 \text{ Гн}; L_{11} = 0.36 \text{ Гн};
 \end{aligned}$$

ємності у вітках схеми:

$$C_6 = 10^{-10} \text{ Ф}; C_{10} = 8.335 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

З метою визначення струмів у індуктивних вітках схеми та напруг на конденсаторах в момент замикання контактів перемикача S у відповідності до законів комутації пропонується згорнути схему так, як це показано на рис. 3.



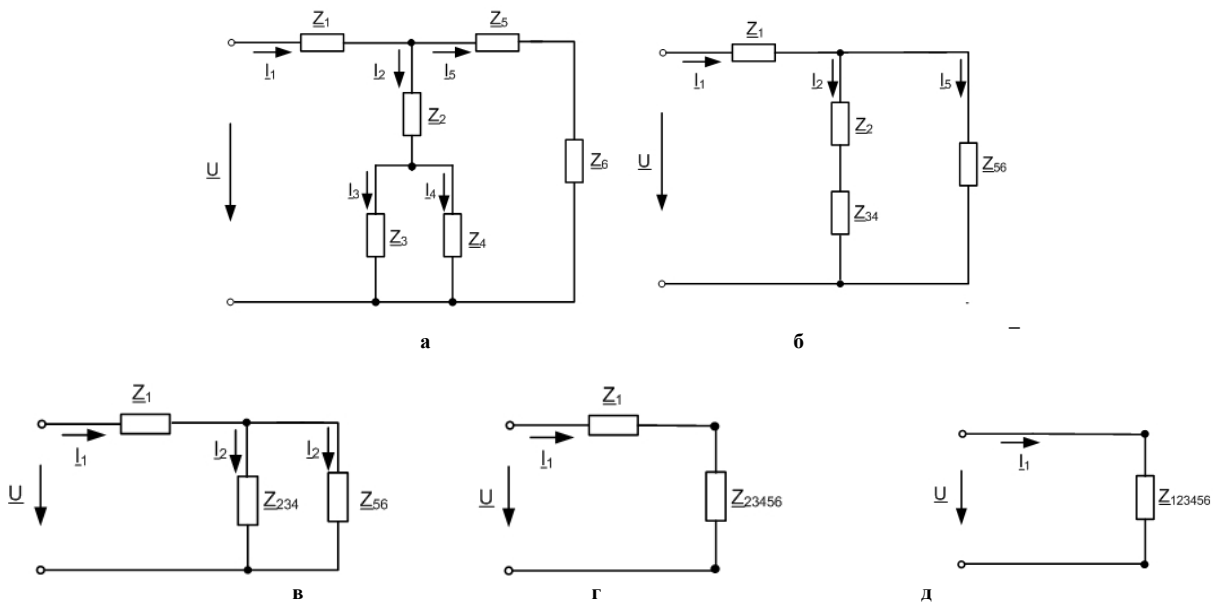


Рис. 3. Варіанти заступних схем під час послідовних перетворень схеми рис. 1

Відповідно до рис. 3 комплексні опори віток знаходяться за виразами:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 = 2.52 + j \cdot 314 \cdot 0.0736 = 2.52 + j23.122, \text{ Ом}, \\
 Z_2 &= R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 = 1800 + j \cdot 314 \cdot 10.032 = 1800 + j3151.646, \text{ Ом}, \\
 Z_3 &= R_3 + j \cdot \omega \cdot L_3 = 3420 + j \cdot 314 \cdot 56.7 = 3420 + j17812.83, \text{ Ом}, \\
 Z_4 &= R_4 + j \cdot \omega \cdot L_4 = 207000 + j \cdot 314 \cdot 10.032 = 2.07 \cdot 10^5 + j3151.646, \text{ Ом}, \\
 Z_5 &= R_5 + j \cdot \omega \cdot L_5 = 1.26 + j \cdot 314 \cdot 0.0024 = 1.26 + j0.754, \text{ Ом}, \\
 Z_6 &= -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_6} = -j \cdot \frac{1}{314 \cdot 10^{-10}} = -j3.183 \cdot 10^7, \text{ Ом}, \\
 Z_7 &= R_7 + j \cdot \omega \cdot L_7 = 1.28 + j \cdot 314 \cdot 0.001 = 1.28 + j0.314, \text{ Ом}, \\
 Z_8 &= R_8 + j \cdot \omega \cdot L_8 = 7482 + j \cdot 314 \cdot 23.83 = 7482 + j7486.415, \text{ Ом}, \\
 Z_9 &= R_9 + j \cdot \omega \cdot L_9 = 3.28 + j \cdot 314 \cdot 0.01 = 3.28 + j3.142, \text{ Ом}, \\
 Z_{10} &= -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{10}} = -j \cdot \frac{1}{314 \cdot 1.667 \cdot 10^{-7}} = -j19094.774, \text{ Ом}, \\
 Z_{11} &= j \cdot \omega \cdot L_{11} = j \cdot 314 \cdot 0.36 = j113.097, \text{ Ом}, \\
 Z_{56} &= Z_5 + Z_6 = 1.26 + j0.754 - j3.183 \cdot 10^7 \approx 1.26 - j3.183 \cdot 10^7, \text{ Ом}, \\
 Z_{34} &= \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} = \frac{(3420 + j17812.83) \cdot (2.07 \cdot 10^5 + j3151.646)}{3420 + j17812.83 + 2.07 \cdot 10^5 + j3151.646} = \\
 &= 4800.938 + j17096.214, \text{ Ом}, \\
 Z_{234} &= Z_2 + Z_{34} = 1800 + j3151.646 + 4800.938 + j17096.214 = \\
 &= 6600.938 + j20247.86, \text{ Ом}, \\
 Z_{23456} &= \frac{Z_{234} \cdot Z_{56}}{Z_{234} + Z_{56}} = \frac{(6600.938 + j20247.86) \cdot (1.26 - j3.183 \cdot 10^7)}{6600.938 + j20247.86 + 1.26 - j3.183 \cdot 10^7} = \\
 &= 6609.344 + j20259.376, \text{ Ом}, \\
 Z_{123456} &= Z_1 + Z_{23456} = 2.52 + j23.122 + 6609.344 + j20259.376 = \\
 &= 6611.864 + j20282.498, \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Подальші розрахунки здійснюємо за наступних початкових умов:

струми в індуктивних елементах схеми у відповідності до першого закону комутації при  $t=0$  секунд:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= U/Z_{123456} = 0.084 - 0.257 \cdot i, \quad I_1(0+) = I_{10} = -0.257 \text{ А}; \\
 U_{234} &= U_{234}/Z_{234} = 5767.342 - 1.291 \cdot i, \quad I_2(0+) = I_{20} = -0.257 \text{ А}; \\
 I_2 &= U_{234}/Z_{234} = 0.084 - 0.257 \cdot i, \quad I_2(0+) = I_{20} = -0.257 \text{ А}; \quad i \text{ т. п.} \\
 I_3(0+) &= I_{30} = -0.258 \text{ А}, \quad I_4(0+) = I_{40} = 0.001 \text{ А}; \quad I_5(0+) = I_{50} = 0 \text{ А}; \quad I_7(0+) = I_{70} = 0 \text{ А}; \quad I_8(0+) = I_8(0+) = I_{80} = -0.387 \text{ А}; \\
 I_9(0+) &= I_{90} = -0.387 \text{ А}; \quad I_{11}(0+) = I_{110} = -0.236 \text{ А},
 \end{aligned}$$

напруги на ємнісних елементах заступної схеми у відповідності до другого закону комутації:

$$U_{C6(0+)} = U_{c6} = -1.291 \text{ В}; \quad U_{C10(0+)} = U_{c10} = -43.192 \text{ В}.$$

Струм у первинній обмотці трансформатора напруги в операторній формі запису з врахуванням початкових умов:

$$I_2 = - \left\{ \frac{\left( \begin{aligned} &8.36447 \cdot 10^{44} + 2.16396 \cdot 10^{43} S + 1.38235 \cdot 10^{41} S^2 - 8.26273 \cdot 10^{37} S^3 - \\ &- 7.94195 \cdot 10^{35} S^4 - 2.13715 \cdot 10^{32} S^5 - 2.12433 \cdot 10^{28} S^6 - 9.1229 \cdot 10^{23} S^7 - \\ &1.42876 \cdot 10^{19} S^8 + 43267.4 S^9 + 1.75442 \cdot 10^{-9} S^{10} \end{aligned} \right)}{\left( \begin{aligned} &(207000 + 10.032S)(98596 + S^2)(1.0876 \cdot 10^9 + 1.40023 \cdot 10^7 S + 1238.27S^2) \\ &\left( \begin{aligned} &1.13851 \cdot 10^{25} + 3.20509 \cdot 10^{23} S + 2.26043 \cdot 10^{21} S^2 + 3.062 \cdot 10^{17} S^3 + 9.56713 \cdot 10^{12} S^4 \\ &+ 31414.7 S^5 + 0.944215 \cdot S^6 \end{aligned} \right) \end{aligned} \right)} + \right. \\ \left. + \left( \begin{aligned} &- (1.0867 \cdot 10^9 + 1.40023 \cdot 10^7 S + 1238.27 S^2) \\ &- 1(207000 + 10.032S) \left( \begin{aligned} &- ((1 \cdot 10^{10} (9.22221 + 1.291/S)) / S) - \\ &1(-2.56819 - 1.291/S) \left( \begin{aligned} &7483.28 + \\ &1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) (7482. + \\ &+ 23.83S) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \right) + \right. \\ \left. + 14.6386(10^{20} / S^2 - 1)(208801. + 1 \cdot 10^{10} / S + 20.0664S) \right. \\ \left. \left( \begin{aligned} &7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) (7482. + 23.83S) \right) \right) \\ + 1 \left( \begin{aligned} &- 14.6386(1800 + 10.032S) - 1(207000 + 10.032s) (17.2257 - 2.5638 \cdot 10^6) / \left( \begin{aligned} &98596 + \\ &+ S^2 \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \\ - 1(207000 + 10.032S) \left( \begin{aligned} &0 + 1(207000 + 10.032S) \left( \begin{aligned} &7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831s - 1 \end{aligned} \right) \cdot \\ &7482. + 23.83S \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) - \\ - 1((210420 + 66.732S) \left( \begin{aligned} &1 \cdot 10^{20} / S^2 - 1(208801. + 1 \cdot 10^{10} / S + 20.0664S) \cdot \\ &(7483.28 + 1 \cdot 10^{10} / S + 23.831S - 1(7482. + 23.83S)) \end{aligned} \right)) / \\ \left( \begin{aligned} &3.20509 \cdot 10^{23} + 1.13851 \cdot 10^{25} / S + 2.26043 \cdot 10^{21} S + 3.062 \cdot 10^{17} S^2 \\ &+ 9.56713 \cdot 10^{12} S^3 + 31414.7 S^4 + 0.944215 S^5 \end{aligned} \right), A. \end{aligned} \quad (5)$$

Після зворотного перетворення Лапласа математична модель струму  $i_2(t)$  записується у вигляді наступного виразу:

$$I_2 = -239,213 \cdot e^{-20634t} + 239,213 \cdot e^{-20633,9t} - 6,82362 \cdot e^{-11229,8t} + 7,16698 \cdot e^{-11228,5t} - \\ - 4,50157 \cdot e^{-78,2618t} + 3,90903 \cdot e^{-78,488t} + 0,4989 \cdot e^{-65,32t} + \\ + 0,04 \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t - 55,845^\circ) + e^{-632,223t} 0,237 \cdot 2 \cdot \sin(3,18309 \cdot 10^6 \cdot t - 90,136^\circ), A.$$

Запропонована математична модель дає можливість досліджувати процес зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги в часі, графік якого наведений на рис. 4

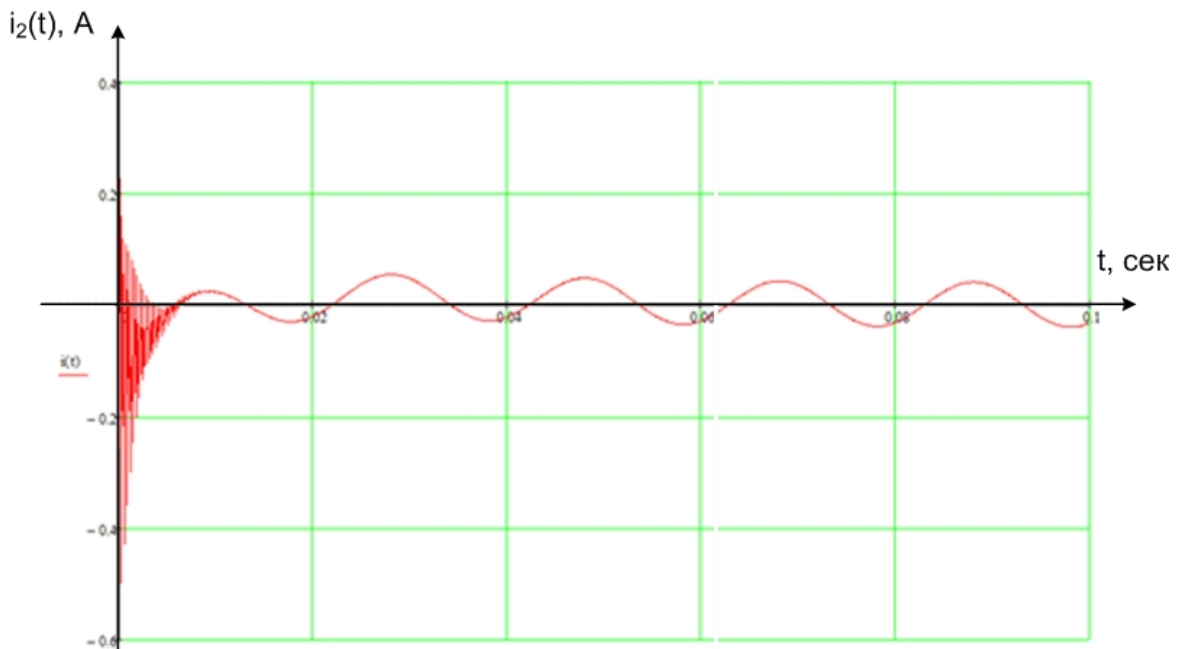


Рис. 4. Графік процесу зміни струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги в часі

#### Обговорення результатів

Отже, під час увімкнення ФЕС в розподільній мережі виникають високочастотні коливання (рис. 4). Просте перетворення Фур'є рівняння, яке описує графік, що показаний на рис. 4 свідчить про те, що в струмі  $I_2(t)$  (рис. 4) присутні гармоніки, окрім промислової частоти 50 Гц, ще інші, досить впливові на графік гармоніки, частотами 150, 300 та 450 Гц.

Амплітудне значення високочастотних коливань струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора напруги значно перевищує амплітудне значення струму в первинній обмотці в усталеному

режимі. Варто очікувати, що це призведе до значних перенапруг.

Громіздкість розрахунків свідчить про доцільність подальшого створення комп'ютерних моделей розподільних мереж з ФЕС, які дозволяють зменшити похибку моделювання за рахунок моделювання режимів у трифазних мережах та за рахунок використання вже розроблених комп'ютерних моделей вимірювальних та силових трансформаторів, які враховують нелінійні їх параметри. Таким загальнодоступним програмним забезпеченням є PS CAD, Matlab Simulink і т. п. [16]. Використаний авторами, під час досліджень, пакет PS CAD, маючи якісні комп'ютерні програмні моделі електричної мережі, фотовольтаїчних електричних станцій, ліній електропередач, силових трансформаторів і т. п., дозволяє швидко створювати та досліджувати комп'ютерні моделі ЛЕС.

#### Висновки

Результати дослідження струмів в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги свідчать про те, що зменшення частоти гармонійних складових у напругах 6–35 кВ особливо під час ферорезонансів та під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів ФЕС, призводить до значного зростання струмів у обмотках високої напруги цих трансформаторів та до перегріву і теплового пошкодження ізоляції.

У кабельних муфт поява в фазних напругах гармонійних складових 150, 300, 450 Гц призводить до зростання ємнісного струму, перегріву та пошкодження кабельних муфт. Перенапруги викликають не поодинокі спрацьовування розрядників та зменшення їх комутаційного ресурсу.

Використання методів математичного моделювання, методів теорії електричних кіл та програмного пакету Wolfram Mathematica або інших подібних до нього, які застосовуються під час сучасних наукових досліджень, дозволяє отримати математичні моделі процесів зміни струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ.

Складність математичних виразів струмів та напруг в обладнанні локальних електричних систем з РДЕ отриманих з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica, або інших подібних до нього, ускладнює їх сприйняття, розуміння та аналіз, тому доцільнішим є використання в дослідженнях комп'ютерних моделей створених в програмному забезпеченні PS CAD, Matlab Simulink і т. п.

#### Література

1. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. □ 2015. □ № 2. – С. 134□145. □ ISSN 2307-5732.
2. Лежнюк П. Д. Вплив ВДЕ на втрати активної потужності в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І.О. Гунько // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2015. □ № 3 (92). □ С. 84□90.
3. Лежнюк П.Д. Забезпечення оптимального керування нормальними режимами БЕС шляхом підвищення надійності високовольтних вводів / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво. - 2014. - № 25. - С. 92□100.
4. Лежнюк П.Д. Автоматизація роботи розосереджених джерел електроенергії в локальній електричній системі на основі концепції SMART Grid / П.Д. Лежнюк, О.В. Нікіторович, О. А. Ковальчук, В.В. Кулик // Праці Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2013. – С. 136–143. – ISSN 1727-9895.
5. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс] / Інжинірингова компанія // Нові енергетичні технології. – Режим доступу : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.
6. Timbus A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system / A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – № 3. – P. 654□664. □ DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.
7. Рекомендации по организации учета и анализа отключений в воздушных электрических сетях напряжением 0,38-20 кВ. – М. : ОРГРЭС, 1994. – 20 с.
8. Миловидов С. С. Надежность городских кабельных сетей [Електронний ресурс] / С. С. Миловидов, Д. Е. Павликов // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68) – С. 1□3. – Режим доступу : <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.
9. Красников В. И. Аварийные режимы сельских электрических сетей напряжение 0,38 кВ / В. И. Красников // Повышение качества электрификации сельскохозяйственного производства и его электроснабжения. Труды МИИСП. – М., 1981. – С. 63□65.
11. Виноградов А.В. Анализ повреждаемости электрооборудования электротехнических сетей и обоснования мероприятий по повышению надёжности электроснабжения потребителей [Электронный ресурс] / А. В. Виноградов, Р. А. Перьков // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. □ 2015 □ № 12 (55).□ С. 12□21. – ISSN 2227-9407. – Режим доступу : <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.
12. Vachirasricirikul S. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // 6th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2009. – С. 21–25. – DOI:

10.1109/ECTICON.2009.5136966.

13. Hartono B. Review of Microgrid Technology / B. Hartono, R. Setiabudy // International Conference on QiR. – 2013. – С. 127–132. – DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

14. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces / S. Cobreces, E. J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // IEEE transaction on instrumentation and measurement. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

15. Peng F. Z. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid [Електронний ресурс] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // IEEE. □ 2009. – Режим доступу : <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

16. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardization / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla // IEEE transactions on industrial electronics. □ 2011. □ № 1. □ С. 158–172. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

17. Дерев'яно Д.Г. Аналіз впливу сонячних електростанцій на показники якості електричної енергії [Електронний ресурс] / Д.Г. Дерев'яно, В.В. Мирошніченко // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ : зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Режим доступу : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>

18. Дерев'яно Д.Г. Особливості оцінки стійкості та надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією / Д.Г. Дерев'яно // Гірництво. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688

19. Кравчук С. В. Узгодження графіків генерування фотоелектричних станцій та навантаження локальних електричних систем / С. В. Кравчук [та ін.] // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 9 (1285). – С. 44–50.

#### References

1. Lezhniuk P.D. Vplyv inverteriv SES na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii v LES / P. D. Lezhniuk, O. Ye. Rubanenko, I.O. Hunko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. □ 2015. □ № 2. – С. 134–145. □ ISSN 2307-5732.

2. Lezhniuk P. D. Vplyv VDE na vtraty aktyvnoi potuzhnosti v LES / P. D. Lezhniuk, O. O. Rubanenko, I.O. Hunko // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2015. □ № 3 (92). □ С. 84–90.

3. Lezhniuk P.D. Zabezpechennia optymalnoho keruvannia normalnymy rezhymamy EES shliakhom pidvyshchennia nadiinosti vysokovoltynykh vvodiv / P. D. Lezhniuk, I. O. Hunko // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho uni-versytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyy instytut». Seriya: Hirnyctvo. - 2014. - № 25. - С. 92–100.

4. Lezhniuk P.D. Avtomatyzatsiia roboty rozoseredzhenykh dzherel elektroenerhii v lokalnii elektrychnii systemi na osnovi kontseptsii SMART Grid / P.D. Lezhniuk, O.V. Nikitorovych, O. A. Kovalchuk, V.V. Kulyk // Pra-tsi Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy : zbirnyk naukovykh prats. Spetsialnyi vypusk. – 2013. – С. 136–143. – ISSN 1727-9895.

5. Budivnytstvo promyslovykh SES [Elektronnyi resurs] / Inzhynirynhova kompaniia // Novi enerhetychni tekhnologii. – Rezhym dostupu : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.

6. Timbus A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system / A. Timbus, M. Lissner, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – № 3. – С. 654–664. □ DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.

7. Rekomendatsyy po orhanyzatsyy ucheta y analiza otkliucheny v vozdushnykh elektrycheskykh setiakh na-priazhenyem 0,38-20 kV. – М.: ОРХРЭС, 1994. – 20 с.

8. Mylovydov S. S. Nadezhnost horodskyykh kabelnykh setei [Elektronnyi resurs] / S. S. Mylovydov, D.E. Pavlykov // Novosti elektrotekhniki. – 2011. – № 2 (68) – С. 1–3. – Rezhym dostupu : <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.

9. Krasnykov V. Y. Avariynye rezhymy selskykh elektrycheskykh setei napriazhenye 0,38 kV / V. Y. Kra-snykov // Povyshenye kachestva elektryfikatsyy selskokhoziaistvennoho proyzvodstva y cho elektrosnabzheniya. Tруды МЫУСР. – М., 1981. – С. 63–65.

10. Vynohradov A.V. Analiz povrezhdaemosti elektrooborudovaniya elektrotekhnicheskyykh setei y obos-novaniya meropriyatiy po povysheniyu nadezhnosti elektrosnabzheniya potrebytelei [Elektronnyi resurs] / A.V. Vynohradov, R. A. Perkov // Vestnyk Nyzhehorodskoho hosudarstvennoi ynzhenerno-ekonomicheskoyi yns-tytut. □ 2015 □ № 12 (55). □ С. 12–21. – ISSN 2227-9407. – Rezhym dostupu : <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.

11. Vachirasricirikul S. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // 6th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. – 2009. – С. 21–25. – DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5136966.

12. Hartono B. Review of Microgrid Technology / B. Hartono, R. Setiabudy // International Conference on QiR. – 2013. – С. 127–132. – DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

13. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces / S. Cobreces, E.J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // IEEE transaction on instrumentation and measurement. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

14. Peng F. Z. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a cus-tomer-driven microgrid [Elektronnyi resurs] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // IEEE. □ 2009. – Rezhym dostu-pu : <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

15. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardiza-tion / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla // IEEE transactions on industrial electronics. □ 2011. □ № 1. □ С. 158–172. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

16. Derevianko D.H. Analiz vplyvu soniachnykh elektrostansii na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii [Elektronnyi resurs] / D.H. Derevianko, V.V. Myroshnychenko // Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna. Naukovi pratsi NTUU «KPI», ІЕЕ : зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Rezhym dostupu : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>

17. Derevianko D.H. Osoblyvosti otsinky stiikosti ta nadiinosti roboty lokalnykh system z rozosere-dzhenoiu heneratsiieiu / D.H. Derevianko // Hirnyctvo. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688

18. Kravchuk S. V. Uzghodzhennia hrafikiv heneruvannia fotoelektrychnykh stantsii ta navantazhennia lokal-nykh elektrychnykh system / S. V. Kravchuk [та ін.] // Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI" : зб. наук. пр. Сер.: Novi rishen-nia v suchasnykh tekhnolohiiakh. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – № 9 (1285). – С. 44–50.

Рецензія/Peer review : 7.09.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Кутін В.М.

В.Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ, Г.І. МІХАЛЕВСЬКА  
Хмельницький національний університет

## ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЛІНІЙНОГО ОБЛІКУ

*У статті розглядаються основні вимоги до структури та функціонування геоінформаційної системи технічного лінійного обліку. Використовуючи ГІС для аналітичної роботи, визначаються причини взаємозалежності певних об'єктів, місцеперебування інших, пов'язаних з ними об'єктів, а також причинно-наслідкові зв'язки між ними.*

**Ключові слова:** геоінформаційна система, телекомунікаційна мережа, топографічна карта.

V.TS. MIKHALEVSKYI, G.I. MIKHALEVSKA  
Khmelnitskyi National University

### THE MAIN REQUIREMENTS FOR THE STRUCTURE AND FUNCTIONING OF THE GEOINFORMATION SYSTEM OF TECHNICAL LINEAR ACCOUNT

*The article deals with the basic requirements for the structure and functioning of the geographic information system of technical linear accounting. Using GIS for analytical work, determines the reasons of the interdependence of certain objects, the location of other objects associated with them, as well as causal relationships between them. All information systems are developed, first of all, for making the effective managerial decisions. The ability for using information to make the managerial decisions is stipulated by such its basic using indicators of quality as: representativeness, content, adequacy, accessibility, relevance, timeliness, accuracy, stability, visibility. To overlay the information on an electronic card and its further analysis in order to make the decision is the most conveniently carried out with the help of geographic information systems (GIS). The large-scale increase of usage the GIS-systems worldwide and the diverse implementation of geographic information resources largely connect with the need to improve information systems that provide decision-making at all levels. The peculiarities of the evolution in the information and communication modern environment (globalization, development of communication technologies, network multimedia digital communication facilities) are the confirmation of the communication effectiveness in terms of history, theory, practice of informational noospherogenesis. Using GIS for analytical work, you can understand the reasons between the interdependence of certain objects, the location of others, the objects associated with them, and also the causal relationships between them. Obtaining such information allows you more deeply to examine the situation, to make the right choice, to make more informed management decision, or to prepare better for future events. However, GIS is not a decision-making tool, but the instrumentality to accelerate and improve the efficiency of the decision-making process, providing responses to queries and spatial analysis functions, presenting analytical results in a clear and perceptive way. The needed for decision-making information can be presented in a concise cartographic form with additional text explanations, charts and diagrams. The availability of information perceptions and generalization allows you to focus on finding a solution without spending too much time collecting and analyzing available heterogeneous data. You can quickly review several solution options and choose the most effective one.*

**Keywords:** geoinformation system, telecommunication network, topographic map.

**Постановка проблеми.** Для нашої країни, що перебуває на стадії системних суспільних перетворень, питання формування інформаційної та аналітичної бази для прийняття управлінських рішень є особливо актуальним [1]. Відтак, об'єктивно вимогою стає всебічне використання сучасних інформаційних технологій. При цьому стратегія інформаційно-аналітичного забезпечення полягає у формуванні єдиної системи збору, обробки, зберігання та передачі інформації в цій сфері [2, 3].

Будь-яке рішення формується на інформаційній основі і для його прийняття слід врахувати максимальну кількість інформаційних ресурсів. «Краща інформованість дозволяє прийняти краще рішення».

Всі інформаційні системи розробляються, в першу чергу, для прийняття ефективних управлінських рішень. Можливість використання інформації для прийняття управлінських рішень обумовлюється такими основними її користувальними показниками як [4]: репрезентативність, змістовність, достатність, доступність, актуальність, своєчасність, точність, стійкість, наочність.

Для підвищення репрезентативності, змістовності та достатності інформації необхідно врахування більшої кількості початкових даних, інформації з різних джерел, а просторова прив'язка дозволяє зробити цю інформацію зручною для її сприйняття та використання при прийнятті рішення.

Накладання інформації на електронну карту та її подальший аналіз з метою прийняття рішення найбільш зручно проводити за допомогою геоінформаційних систем (ГІС).

**Формування цілей статті (Постановка завдання).** Дослідити основні проблеми, пов'язано зі створенням геоінформаційної системи (ГІС) телекомунікаційного підприємства та умови її функціонування.

**Виклад основного матеріалу.** ГІС – це програмно-апаратний комплекс, що забезпечує збір, відображення, обробку, аналіз і поширення інформації щодо просторового розподілу об'єктів та явищ на основі електронних карт, пов'язаних з ними баз даних і супутніх матеріалів. Тобто ГІС – це програмне забезпечення, що дозволяє зв'язати географічну інформацію (просторове розташування процесів і об'єктів) з описовими інформаційними ресурсами [4–6].

Широкомасштабне нарощування використання ГІС-систем, що відбувається в усьому світі, і різнопланове впровадження геоінформаційних ресурсів у значній мірі пов'язане з необхідністю вдосконалення інформаційних систем, які забезпечують прийняття рішень будь-якого рівня.

Геоінформаційна система технічного лінійного обліку (ГІС ТЛО) має складатись з чотирьох

підсистем:

1. Супроводу бази просторових даних.
2. Картографічної підтримки обліку обладнання і паспортизації лінійних споруд телефонної мережі (Підсистема картографічної підтримки обліку лінійних споруд).

3. Ділового картографування.

4. Просторових веб-сервісів.

Програмна архітектура перелічених підсистем повинна бути розподілена на слабозв'язані програмні рівні. До складу підсистем можуть входити такі програмні рівні:

**Презентаційний рівень** – охоплює засоби та функції взаємодії користувача з системою. Може бути оформленим у вигляді «тонкого» (використання документів HTML, браузера MS Internet Explorer) клієнта.

**Рівень ділової логіки** – реалізує функції та правила обробки даних.

**Рівень даних** – включає запити до бази даних, обмін даними, управління транзакціями. Даний шар складається з програмних компонентів, що формують запити до даних мовою, СКБД та драйверів даних, і самих даних.

Кожен із рівнів може додатково розподілятися на шари споріднених програмних компонент та модулів.

**Підсистема супроводу бази просторових даних** призначена для ведення і актуалізації бази просторових об'єктів (електронних карт) та атрибутної БД, зв'язаної з просторовими об'єктами. Підсистема супроводу бази просторових даних повинна забезпечити супровід базової топографічної карти та карти об'єктів телекомунікаційних мереж.

Для задоволення потреб замовника потрібен шар мережі наземних та підземних комунікацій комунальних та інших служб. Замовник може самостійно вводити таку інформацію за допомогою Підсистеми супроводу бази геоданих.

Постачальник базової топографічної карти повинен надавати повний варіант карти та варіант карти з грифом не вище «для службового використання». Такий варіант карти має містити обмежений набір картографічних та атрибутивних даних, конфіденційність яких визначається внутрішнім регламентом замовника.

Таблиця 1

Класи об'єктів та основні характеристики

№	Клас об'єкта	Тип об'єкта	Зв'язані класи	Положення визначається
1	Станція телефонна	РТ/Р	Будівля, адреса	Геокодування
2	Станція (пункт) підсилювальна (регенераційна), необслуговувана	РТ	Координати	Планшет, Прив'язка, GPS, Вручну (положення умовне)
3	Підстанція телефонна	РТ/Р	Будівля, адреса	Геокодування
4	Шафа кабельна, розподільна	РТ	Будівля, адреса, координати	Геокодування, Планшет, Прив'язка, GPS, Вручну (положення умовне)
5	Ящик кабельний телефонний	РТ	Будівля, адреса, координати, опора	Геокодування, Планшет, Прив'язка, GPS
6	Кабельний ввід	РТ	Будівля, адреса	Прив'язка, Вручну (положення умовне)
7	Споруда оглядова	РТ	Координати	Планшет, Прив'язка, GPS
8	Муфта (не в оглядовій споруді)	РТ	Координати	Планшет, Прив'язка, GPS, Вручну (положення умовне)
9	Опора	РТ	Координати	Планшет, Прив'язка, GPS, Вручну (положення умовне)
10	Стійка телефонна	РТ	Будівля, адреса	Геокодування
11	Замірний стовпчик	РТ	Координати	Планшет, Прив'язка, GPS
12	Каналізація кабельна	L	Вулиця	Автоматичне створення з набору оглядових споруд
13	Лінії телефонного зв'язку	L		Планшет, GPS, Вручну (положення умовне)
14	Проводи повітряні	L	Вулиця	Автоматичне створення з набору опор або стояків
15	Зона дії станції телефонної		Будівля, адреса, вулиця	По набору адрес
16	Шафний район		Будівля, адреса, вулиця	По набору адрес

**Примітка.** РТ – точковий об'єкт, Р – полігональний об'єкт, L – лінійний об'єкт.

Виходячи з можливості визначення координат та положень об'єктів, що підлягають технічному лінійному обліку, визначено перелік класів геооб'єктів, які будуть міститись в карті об'єктів телекомунікаційних мереж. Їх перелік та основні характеристики – в таблиці 1.

В загальному випадку посадові обов'язки співробітників, що пов'язані із виконанням функцій та задач системи модифікуються у відповідності до рішень з організаційного забезпечення, зокрема:

- додаються функції, пов'язані із веденням базової карти та карти об'єктів телекомунікаційних мереж (для Керівника ГІС-групи та ГІС-оператора);
- модифікуються обов'язки виконання виробничих функцій, що автоматизуються в рамках даної системи (керівник підрозділу, інженер (технік) підрозділу);
- додаються функції, пов'язані із обслуговуванням системи (виконання процедур збереження та відновлення баз даних, зберігання компонентів системи тощо) (для адміністратора ГІС);

До посадових інструкцій персоналу системи додаються інструкції з обробки даних та керівництва користувачів системи (зі складу експлуатаційної документації системи).

**Вимоги до організації системи безпеки.** Функції ГІС, пов'язані із веденням базової карти та карти об'єктів телекомунікаційних мереж, що зберігаються на сервері геоданих та картографічному веб-сервері виконуються в ізольованому від сторонніх осіб приміщенні, обладнаному охороною та пожежною сигналізацією. Доступ до сервера геоданих мають лише користувачі системи, яким за їх функціональними обов'язками належить виконання функцій ведення базової карти та карти об'єктів телекомунікаційних мереж.

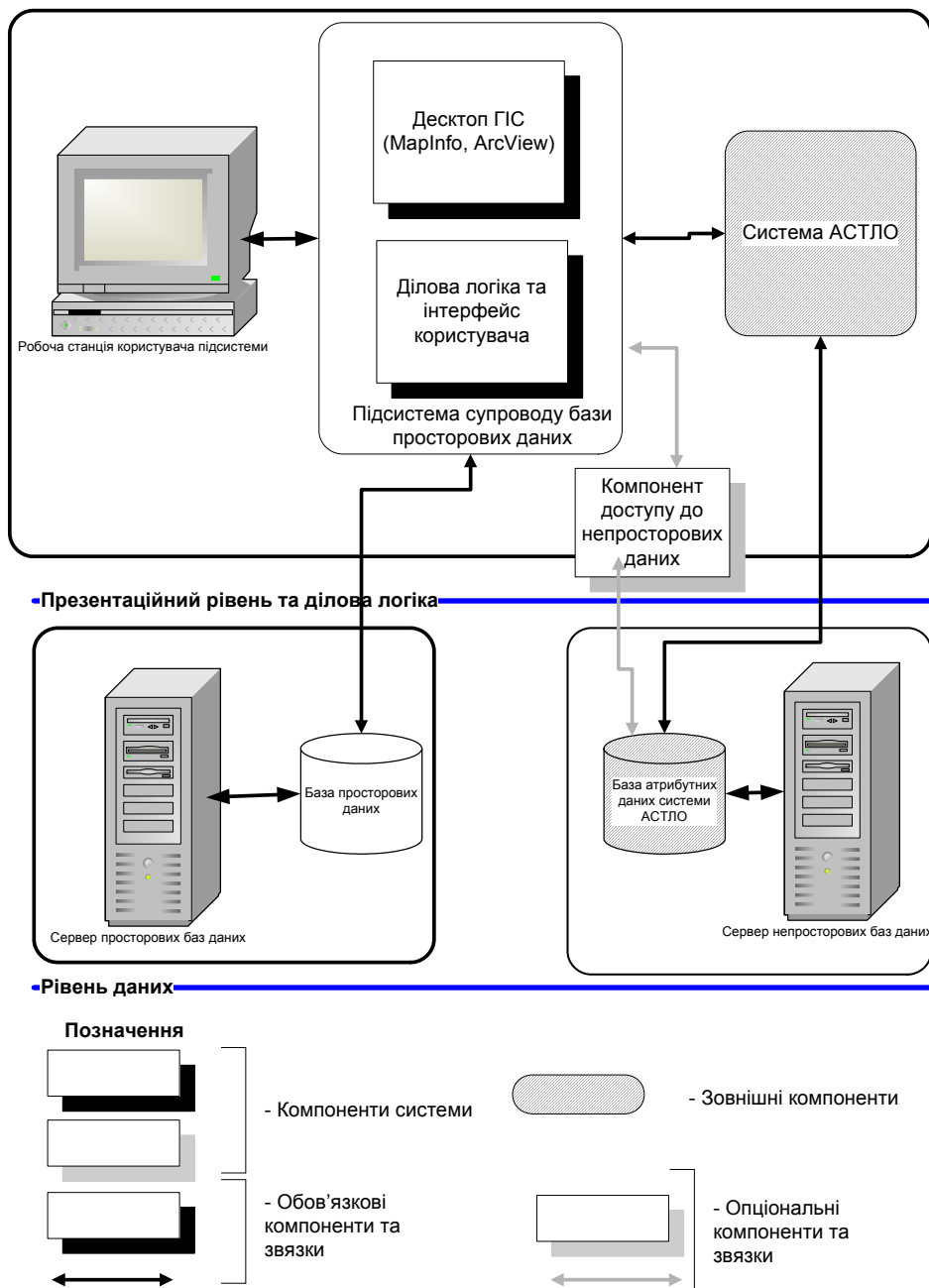


Рис. 1. Архітектура підсистеми супроводу бази просторових даних

Зв'язок із зовнішніми користувачами даних виконується через пристрій-шлюз із функціями технічного захисту інформації. Режимні картографічні матеріали, що використовуються для ведення базової карти, повинні використовуватись у відповідності до нормативних документів замовника.

Серверна база геоданих та підсистема ГІС по веденню базової карти буде забезпечувати вимоги до використання картографічних матеріалів відповідних масштабів згідно вимог нормативних документів.

Серверна база геоданих та підсистема ГІС по веденню карти об'єктів телекомунікаційних мереж буде забезпечувати вимоги до використання матеріалів технічного лінійного обліку згідно з відповідними документами політики безпеки.

Кінцевий користувач буде мати доступ тільки до обмеженого набору картографічних та атрибутивних даних, конфіденційність яких визначається Замовником.

Серверна база геоданих та підсистема ГІС по веденню базової та карти об'єктів телекомунікаційних мереж будуть ізольованими. Зв'язок із зовнішніми користувачами інформації буде відбуватись через шлюзи захисту інформації (або сервер технічного захисту інформації) відповідно до сертифікату.

Архітектура підсистеми супроводу бази просторових даних включає два рівні – презентаційний та даних. Рівень ділової логіки окремо не виділяється. Всі ділові функції системи інтегруються в презентаційний рівень. Архітектура підсистеми супроводу бази просторових даних наведена на рис. 1 [4].

Як основний програмний засіб презентаційного рівня має використовуватись настільна картографічна система MapInfo Professional (компанія MapInfo Corp.) чи ArcView (компанія "ESRI").

Підсистема супроводу бази просторових даних взаємодіє із зовнішньою автоматизованою системою технічного лінійного обліку (АСТЛЮ). Система АСТЛЮ виступає сервером для підсистеми супроводу, надаючи атрибутивну інформацію про просторові об'єкти, що входять до складу обох систем. Атрибутивна інформація має обмежуватись ідентифікаційними атрибутами та унікальним кодом об'єкта системи АСТЛЮ. **(Ідентифікаційними** називаються атрибути, що дозволяють ідентифікувати просторовий об'єкт в реальному світі. Як правило, ідентифікаційними атрибутами виступають назва об'єкта, унікальний номер, адреса. Координати та точки прив'язок не повинні розглядатись як ідентифікаційні атрибути). Значення ідентифікаційних атрибутів повинні забезпечувати однозначне визначення реальних об'єктів.

Інформація про ідентифікаційні атрибути повинна надаватись системою АСТЛЮ через програмні інтерфейси. Якщо наявних програмних інтерфейсів виявиться не досить для організації обміну даними, між системами, в рамках підсистеми супроводу може бути створений програмний компонент рівня даних, що буде отримувати дані безпосередньо з БД системи АСТЛЮ.

Підсистема супроводу бази просторових даних призначена для ведення і актуалізації бази просторових об'єктів (електронних карт) та атрибутивної БД, зв'язаної з просторовими об'єктами. Підсистема супроводу бази просторових даних повинна забезпечити супровід базової топографічної карти та карти об'єктів телекомунікаційних мереж.

Функції підсистеми супроводу розділяються на дві групи:

- функції супроводу базової топографічної карти;
- функції ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж.

Для першої групи функцій мають місце мінімальні зв'язки з іншими системами, зокрема з системою АСТЛЮ. При реалізації функцій ведення карти об'єктів мереж мають бути враховані наявні умови експлуатації системи АСТЛЮ та реалізовані в указаній системі функціональні можливості. Також при реалізації функцій слід врахувати, що система АСТЛЮ експлуатується підрозділами виробничої структури Замовника, співробітники Замовника пройшли навчання і набули практичних навиків в експлуатації АСТЛЮ. Тому бажано, щоб нові функції по веденню карти об'єктів телекомунікаційних мереж не впливали на спосіб взаємодії користувачів з системою АСТЛЮ. З врахуванням наведених факторів передбачено реалізацію функцій ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж в одному з двох варіантів.

**Варіант 1.** Презентаційний рівень функцій ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж реалізується в системі АСТЛЮ. (Тобто інтерфейс користувача для введення та редагування просторових характеристик об'єктів телекомунікаційних мереж надається системою АСТЛЮ.) Інтерфейс користувача для ведення просторових характеристик інтегрується з інтерфейсом для ведення непросторових характеристик об'єктів.

Для забезпечення роботи системи АСТЛЮ система ГІС надає в систему АСТЛЮ базову топографічну карту. Система АСТЛЮ виконує необхідні перетворення базової топокарти до своїх внутрішніх форматів (базова топографічна карта, що надається системі АСТЛЮ, повинна допускати використання в режимі «для службового користування»).

В системі АСТЛЮ відбувається введення чи редагування об'єктів телекомунікаційних мереж. При виконанні операцій по роботі з просторовим поданням об'єктів повинні виконуватись вимоги до функцій ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж. Після виконання операцій з об'єктами телекомунікаційних мереж система АСТЛЮ повертає метричні характеристики об'єктів до системи ГІС. Геометрія об'єктів надається системою АСТЛЮ в форматі та системі координат базової топографічної карти.

Даний варіант допускає використання закритих картографічних форматів для виконання операцій редагування геометрії об'єктів. Використання закритих форматів повинно бути інкапсульовано виключно в системі АСТЛЮ. До бази даних ГІС геометрія об'єктів має попадати в форматах обраної геоінформаційної платформи (MapInfo чи ESRI). З метою уніфікації геоінформаційної платформи в структурах замовника



можна рекомендувати заміну закритої платформи системи АСТЛЮ на відкриту платформу (MapInfo чи ESRI) в одній з подальших версій системи АСТЛЮ.

**Варіант 2.** Презентаційний рівень функцій ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж реалізується в системі ГІС. Інтерфейс користувача для ведення просторових характеристик не інтегрується з інтерфейсом для ведення просторових характеристик об'єктів. Даний варіант має суттєвий недолік, оскільки введення інформації про одні і ті ж об'єкти виконується в різних підсистемах. Тому реалізація функцій ведення карти об'єктів телекомунікаційних мереж згідно з варіантом 2 буде виконана, якщо з технічних чи інших причин реалізація за варіантом 1 виявиться неефективною.

**Висновки.** Таким чином, особливості еволюції інформаційно-комунікаційного сучасного середовища (глобалізація, розвиток комунікаційних технологій, мережових мультимедійних цифрових засобів зв'язку) є підтвердженням ефективності комунікації з точки зору історії, теорії, практики інформаційного ноосферогенезу.

Використовуючи ГІС для аналітичної роботи, можна зрозуміти причини взаємозалежності певних об'єктів, місцеперебування інших, пов'язаних з ними об'єктів, а також причинно-наслідкові зв'язки між ними. Одержання такої інформації дає змогу більш глибоко вивчити ситуацію, зробити правильний вибір, прийняти більш виважене управлінське рішення, або краще підготуватися до майбутніх подій. Проте, ГІС – це не інструмент для видачі рішень, а засіб, що допомагає прискорити та підвищити ефективність процедури прийняття рішень, що забезпечує відповіді на запити і функції аналізу просторових даних, подання результатів аналізу в наочному та зручному для сприйняття вигляді. Необхідна для прийняття рішень інформація може бути представлена в лаконічній картографічній формі з додатковими текстовими поясненнями, графіками та діаграмами. Наявність доступної для сприйняття і узагальнення інформації дозволяє зосередити зусилля на пошук рішення, не витрачаючи значного часу на збір і аналіз доступних різномірних даних. Можна досить швидко розглянути кілька варіантів рішення і вибрати найбільш ефективний.

### Література

1. Про телекомунікації [Електронний ресурс] : закон України : прийнято Верховною Радою України 18.12.2017 № 1280-IV. – Режим доступу : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1280-15>
2. Плескач В.Л. Інформаційні технології та системи / Плескач В.Л. – К. : Книга, 2005. – 520 с.
3. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації : указ Президента України від 07.11.2014 р. № 862/2014.
4. Светличный А.А. Основы геоинформатики : учебное пособие / А. А. Светличный, С. В. Плотницкий. – Сумы : Университетская книга, 2006. – 294 с.
5. Clifford N. Key Methods in Geography / N. Clifford, S. French, G. Valentine (Eds.). – SAGE, 2010. – 569 p.
6. Gomez B. Research Methods in Geography: A Critical Introduction / B. Gomez, J.P. Jones (Eds.). – Blackwell Publishing, 2010. – 459 p.

### References

1. Pro telekomunikatsii [Elektronnyi resurs] : zakon Ukrainy : pryiniato Verkhovnoiu Radoiu Ukrainy 18.12.2017 № 1280-IV. – Rezhym dostupu : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1280-15>
2. Pleskach V.L. Informatsiini tekhnolohii ta systemy / Pleskach V.L. – K. : Knyha, 2005. – 520 s.
3. Pro Natsionalnu komisiuu, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuвання u sferi zviazku ta informatyzatsii : ukaz Prezydenta Ukrainy vid 07.11.2014 r. № 862/2014.
4. Svetlichnyi A.A. Osnovy heoinformatiki : uchebnoe posobie / A. A. Svetlichnyi, S. V. Plotnytskyi. – Sumy : Universitetskaia kniga, 2006. – 294 s.
5. Clifford N. Key Methods in Geography / N. Clifford, S. French, G. Valentine (Eds.). – SAGE, 2010. – 569 p.
6. Gomez B. Research Methods in Geography: A Critical Introduction / B. Gomez, J.P. Jones (Eds.). – Blackwell Publishing, 2010. – 459 p.

Рецензія/Peer review : 10.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.11.2018 р.

Рецензент:

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ  
ВИПУСКНИКІВ ТЕХНІЧНИХ ВИШІВ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

У даній статті розроблено математичну модель та метод оцінювання рівня якості підготовки випускників вишів на основі нейро-нечіткого підходу, що дозволяє ідентифікувати обґрунтовану множини оцінювальних параметрів, врахувати полі функціональний вплив зовнішнього середовища та дає можливість декомпозиції процесу оцінювання засобами системного підходу.

Ключові слова: математична модель, якість підготовки випускників, нечітка логіка.

A.O. AZAROVA, O.M.ROIK, A.V. POPLAVSKYI, D.P. PRYSYAGNYI, I. S. KAPLUN  
Vinnytsia National Technical University

**INFORMATION TECHNOLOGIES OF ESTIMATION THE QUALITY LEVEL OF GRADUATES TRAINING IN  
TECHNICAL UNIVERSITY BY MEANS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

*Abstract: The mathematical model and method for estimation the quality level of graduates training on the basis of a neuro-fuzzy approach, which make possible identifying a reasonable set of estimation parameters, taking into account the multifunctional influence of the external environment and allowing the decomposition of the evaluation process by means of a system approach are developed in the article.*

*The purpose of the article is formalization of the process of estimating the quality level of graduates training in technical universities for further improvement through the formation of appropriate complex target program.*

*The scientific novelty of the obtained results is the formation of methodological principles for estimating the quality level of graduates training on the basis of the mathematical apparatus of artificial intelligence and modern mathematical automated means. In particular, for the first time, it was proposed: the mathematical model for estimating the quality level of graduates training of technical universities and the method of its formalization, which based on the mathematical apparatus of fuzzy logic and the Hopfield's neural network, which allows precisely and adequately, with a minimum time, to map the set of input parameters to the set of resulting solutions, taking into account the wide range both quantitative and qualitative factors of influence to ensure the complexity and dynamism of such a process; the structural model for estimating the quality level of graduates training of technical universities, which, by means of system theory, allows the decomposition of a complex evaluation procedure into a sequence of elementary components, the identification of which becomes clearly formalized.*

*Keywords: mathematical model, quality of graduates training, fuzzy logic.*

**ВСТУП**

Модернізація вищої освіти, необхідність її переходу на якісно новий рівень, який відповідає сучасним потребам у фахівцях для високотехнологічних фірм та підприємств пов'язана із суттєвою трансформацією функцій їх професійної діяльності, а тому й необхідністю формування нових професійних компетенцій. Така ситуація вимагає кардинальних змін у професійному оцінюванні якості підготовки фахівців технічного профілю.

Для вирішення різнобічних кадрових проблем, які постають перед керівниками виробничих та невиробничих структур, забезпечення своєчасності прийнятих ними рішень необхідно проаналізувати реальний ринок праці, який формується у т.ч. на основі випускників вишів, змоделювати його майбутній розвиток, врахувати можливі ризики і невизначеність. Це стає можливим на основі методів математичного моделювання засобами штучного інтелекту з використанням сучасних інформаційних технологій, що сприятиме прийняттю оптимальних рішень на різних рівнях управління.

У наукових дослідженнях приділяється значна увага методам професійної підготовки фахівців технічного профілю завдяки роботам В. Я. Боброва, Л. О. Каніщенко, К. Ф. Беркита, С. М. Калицького, В. Ю. Стрельнікова, О. В. Кукліна, Й. Бринкеля, В. В. Валешного, Г. О. Ковальчука, В. А. Козакова та ін. Разом із тим, існують невирішені проблеми як у теоретичному, так і прикладному аспектах, що унеможливають якісне оцінювання рівня підготовки випускників технічних вузів через відсутність чітко формалізованого підходу такого процесу автоматизованими засобами. Слід зауважити, що апарат штучного інтелекту, а саме нечіткої логіки та нейронних мереж уможливує комп'ютеризацію процедури розв'язку класифікаційних задач, до яких і належить розглянута в статті проблема.

Новітня професійна підготовка студентів вишів повинна бути універсальною, адаптованою до сучасного ринку праці, з використанням особистісно-орієнтованого підходу до навчального процесу, його інформатизацією та безперервністю. Вона покликана послідовно формувати у спеціалістів економіко-технічне мислення та свідомість, раціональне ставлення до обраної професії в умовах інтеграційних процесів, що відбуваються у державі; озброювати спеціалістів теоретичними знаннями та практичними навичками щодо особливостей роботи, формування потреби бачення перспективи; вчити оволодівати основами наукової організації праці в умовах ринкових відносин; формувати у студентів бажання та потребу повсякденно покращувати результати своєї праці, виховувати в собі якості бережливості, ініціативності, діловитості, дисциплінованості.

Одним із продуктивних шляхів врахування наведених вимог до оцінювання якості підготовки

випускників вишів є застосування математичних апаратів нечіткої логіки (НЛ) та нейронної мережі Хопфілда. Нечітко-логічний підхід дозволяє отримати кардинальні оцінки для якісних параметрів, тобто уможливує процес їх формалізації. Нейронна мережа Хопфілда ідентифікує рівень якості підготовки фахівців за обмеженою кількістю еталонних зразків, що суттєво знижує часові та грошові витрати на прийняття відповідного рішення.

Усі вище перелічені чинники зумовлюють актуальність розроблення відповідних математичних моделей та методологічних підходів до оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів засобами штучного інтелекту.

**Метою статті** є формалізація процесу оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів для подальшого його підвищення шляхом формування комплексної цільової програми його покращення.

## ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ВИПУСКНИКІВ ТЕХНІЧНИХ ВИШІВ

Математична модель оцінювання якості підготовки випускників технічних вишів має включати в себе множину вхідних та вихідних параметрів, яка повинна охоплювати широкий їх спектр і задовольняти умовам повноти, дієвості та мінімальності. Для цього спочатку за критерієм повноти необхідно вибрати таку низку вхідних оцінювальних параметрів, щоб вони якомога ширше характеризували рівень якості підготовки фахівців на базі ґрунтового аналізу всіх його елементів впливу. Обмеження сформованої множини оцінювальних параметрів за критерієм дієвості дозволяє виділити параметри з максимальним ступенем результативності. Подальше скорочення множини слід здійснювати з урахуванням критерію мінімальності, тобто виключення усіх колінеарних, корельованих параметрів та ін.

Автори статті пропонують математичну модель оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів такого вигляду:

$$X^* \rightarrow Y, X^* = \{x_p\}, p = \overline{1, P}, X = f(X^*), X = (x_{ij}), i = \overline{1, n}, j \in M, Y = (y_s), s = \overline{1, S};$$

$$Y = F(f_1, \dots, f_3),$$

$$f_1 = f(x_{11}, \dots, x_{17}), f_2 = f(x_{21}, \dots, x_{25}), f_3 = f(x_{31}, \dots, x_{37}), f_4 = f(x_{41}, \dots, x_{45}), f_5 = f(x_{51}, \dots, x_{510})$$

де функціонал відображення  $F$  оцінюється на базі таких функцій:

-  $f_1$  – оцінювання рівня психофізичних якостей випускника –  $f_1 = f(x_{11}, \dots, x_{17})$ ;

-  $f_2$  – оцінювання рівня фундаментальної підготовки та професійних знань випускника –  $f_2 = f(x_{21}, \dots, x_{25})$ ;

-  $f_3$  – оцінювання рівня особистісних якостей випускника –  $f_3 = f(x_{31}, \dots, x_{37})$ ;

-  $f_4$  – оцінювання рівня професійних здібностей випускника –  $f_4 = f(x_{41}, \dots, x_{45})$ ;

-  $f_5$  – оцінювання рівня професійних навичок випускника –  $f_5 = f(x_{51}, \dots, x_{510})$ .

У свою чергу оцінювальними параметрами для цих функцій є:  $x_{11}$  – зорове сприйняття,  $x_{12}$  – слухове сприйняття,  $x_{13}$  – пам'ять (мнемічні дії),  $x_{14}$  – уява (імажинітивні дії),  $x_{15}$  – усна мова (інтерперсональні дії),  $x_{16}$  – емоційно-вольова регуляція (самоконтроль),  $x_{17}$  – психомоторика (рухові дії);  $x_{21}$  – рівень інтелектуального розвитку,  $x_{22}$  – знання гуманітарно-соціальних наук,  $x_{23}$  – рівень знань професійно-направлених дисциплін,  $x_{24}$  – рівень системності підготовки,  $x_{25}$  – здатність до самонавчання;  $x_{31}$  – уважність (дії зовнішнього контролю),  $x_{32}$  – товариськість (інтерперсональні дії),  $x_{33}$  – розумові навички,  $x_{34}$  – навички міжособистісної комунікації,  $x_{35}$  – рівень виконавської дисципліни,  $x_{36}$  – компромісність,  $x_{37}$  – самоорганізованість та відповідальність,  $x_{37}$  – рівень соціальної адаптації (здатність до колективної праці);  $x_{41}$  – технічні здібності (вміння засвоювати та використовувати технічні можливості),  $x_{42}$  – словесно-логічні здібності (вміння спілкуватися, логічні дії),  $x_{43}$  – соціальні та організаторські здібності,  $x_{44}$  – рівень культурного, етичного і морального виховання,  $x_{45}$  – уміння обґрунтовувати і обирати найкраще рішення;  $x_{51}$  – рівень досвіду в аналізі складних задач, ефективному їх вирішенні,  $x_{52}$  – готовність до роботи в умовах кризових явищ, вміння працювати на підприємствах і в організаціях, незалежно від форми власності,  $x_{53}$  – здатність генерувати нові ідеї, творчо мислити, грамотно опрацьовувати інформацію,  $x_{54}$  – рівень професійної конкурентоспроможності,  $x_{55}$  – здатність до вивчення та прогнозування споживацького попиту,  $x_{56}$  – здатність до розробки стратегій та ведення рекламної діяльності,  $x_{57}$  – здатність до оброблення інформації засобами спеціалізованих інформаційних систем,  $x_{58}$  – спроможність підтримки сучасних Інтернет-технологій управління бізнесом,  $x_{59}$  – дотримання захисту бізнес-інформації в комп'ютерних системах,  $x_{510}$  – вміння грамотно оприлюднювати результати своєї діяльності.

Структурну модель процесу формалізації вищевикладеної математичної моделі розглянемо на рис. 1.

Оскільки потенційний роботодавець, що оцінює рівень підготовки випускника спроможний проаналізувати  $7 \pm 2$  чинники [1] і при цьому безпомилково прийняти кадрове рішення з високим ступенем точності, то доцільним є сформулювати за критеріями повноти та дієвості таку множину вихідних рішень  $Y = (y_s), s = \overline{1, S}$ :

-  $y_1$  – високий рівень якості підготовки випускника технічного вишу;

-  $y_2$  – середній рівень якості підготовки випускника технічного вишу;

-  $y_3$  – низький рівень якості підготовки випускника технічного вишу.

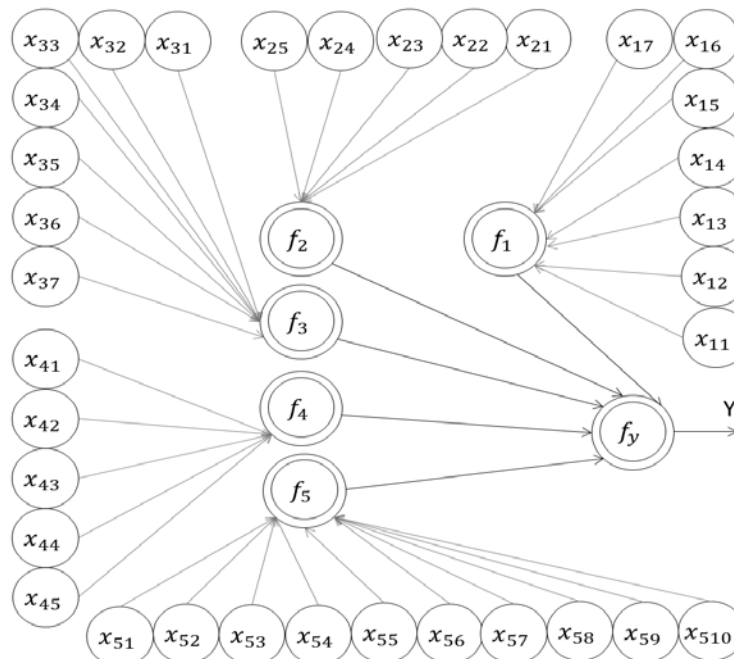


Рис. 1. Структура нечіткої моделі оцінки якості підготовки випускників технічних вишів

**ЕТАП 1. ПРОЦЕДУРА ФОРМАЛІЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НА БАЗІ АПАРАТУ НЕЧІТКИХ МНОЖИН**

Кількісні та якісні оцінювальні параметри розраховуються на базі множини вхідних первинних параметрів  $X^*$ . Для відображення множини вхідних первинних параметрів  $X^*$  на множини вихідних параметрів  $Y$  скористаємося математичним апаратом нечітких множин. Нечітка логіка має особливу перевагу для розв'язку поставленої задачі з урахуванням необхідності отримання кардинальних оцінок якісних параметрів.

Для оцінювальних параметрів будемо використовувати єдину шкалу лінгвістичних термів: Н – низький, С – середній, В – високий.

Множина  $X$  оцінювальних параметрів складається з кількісних:  $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}$  та якісних параметрів впливу (решта). Оскільки для оцінювання значення функцій належності оцінювальних параметрів необхідно мати значення лінгвістичних термів цих показників, то для якісних параметрів пропонується такий підхід.

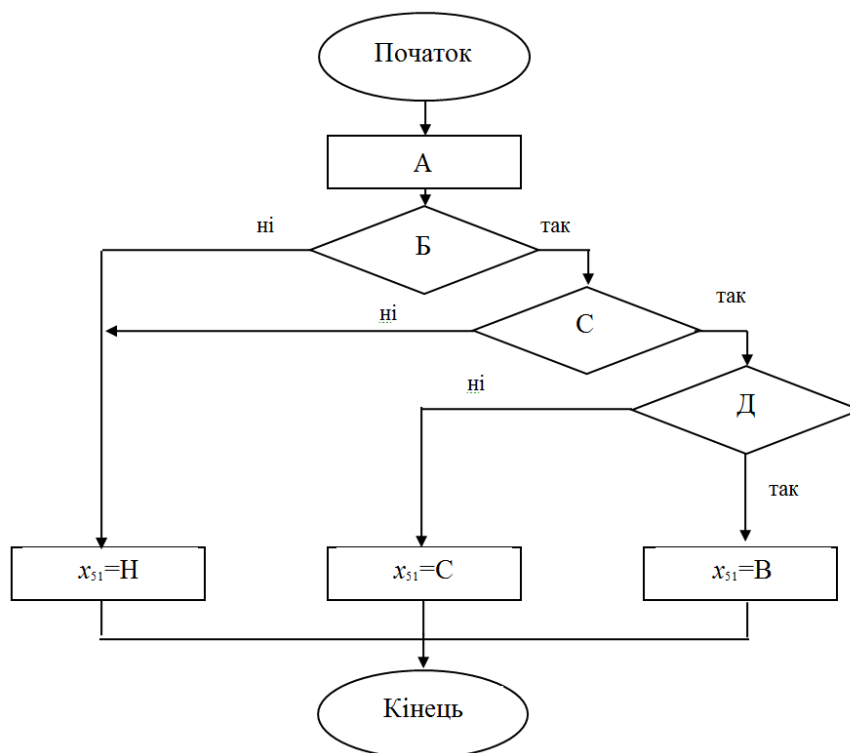


Рис. 2. Граф-схема алгоритму визначення параметру  $x_{51}$

Розглянемо, наприклад, оцінювання якісного параметру  $x_{51}$  – рівень досвіду в аналізі складних задач, ефективному їх вирішенні – відповідним лінгвістичним термом, що здійснюється на базі таких якісних параметрів: кваліфікація співробітників, досвід роботи та наявність вищої освіти. Пропонуємо такий алгоритм обчислення параметру  $x_{51}$ , граф-схема якого наведена на рис. 2. Тут А – аналіз особової картки працівника; Б – високий рівень кваліфікації; С – високий рівень успішності розв’язуваних задач; Д – високий ступінь комплексності та неструктурованості розв’язуваних задач.

Для визначення параметру  $x_{53}$  – рівень професійної конкурентоспроможності – пропонується використовувати такі характеристики, що найбільш повно його описують і мають бальну оцінку (табл. 1).

Таблиця 1

Професійні характеристики оцінювання іміджу керівника	
Найменування параметра	Бальна оцінка - $b_i$
Рівень спеціальних знань	[0 – 5]
Компетентність	[0 – 5]
Здатність приймати рішення	[0 – 5]
Довіра співробітників	[0 – 4]
Оперативність	[0 – 2]
Комунікативність	[0 – 2]

Скориставшись експертними знаннями щодо впливу вхідних параметрів, описаних у табл. 2, на рівень професійної конкурентоспроможності, обчислення параметру  $x_{53}$  пропонується здійснювати за допомогою такого співвідношення:

$$x_{53} = \begin{cases} H, & \text{якщо } 0 \leq \sum_{i=1}^6 b_i \leq 13; \\ C, & \text{якщо } 13 < \sum_{i=1}^6 b_i \leq 14; \\ B, & \text{якщо } 14 \leq \sum_{i=1}^6 b_i \leq 23. \end{cases}$$

Аналогічним чином можна ідентифікувати значення усіх якісних оцінювальних параметрів  $x_{ij}$ , множини X. Для кількісних параметрів –  $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}$  є свої залежності для розрахунку [2].

Після оцінювання значень множини вхідних параметрів, обчислюємо значення функцій їх належності.

Для цього визначимо функції належності для кожного параметру окремо.

Кожен кількісний параметр описується окремою функцією належності трьом нечітким термам як зображено на рис. 3.

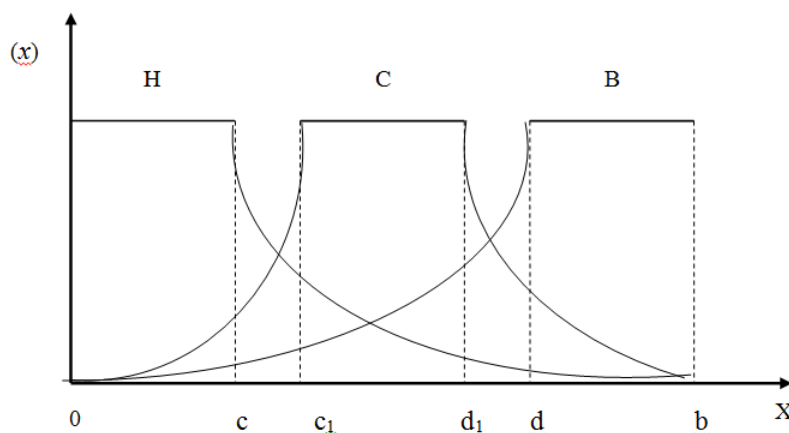


Рис. 3 – Функції належності трьох нечітких термів для кількісних параметрів

$$\mu^H(x) = \begin{cases} 1, & x \in [a, c]; \\ \frac{b-x}{b-c}, & x \in [c, b]; \end{cases} \quad \mu^C(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{c_1-a}, & x \in [a, c_1]; \\ 1, & x \in (c_1, d_1); \\ \frac{b-x}{b-d_1}, & x \in [d_1, b]; \end{cases} \quad \mu^B(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{d-a}, & x \in [a, d]; \\ 1, & x \in (d, b). \end{cases}$$

Значення  $c, c_1, d_1, d, b$  для кожного кількісного параметру визначаються, виходячи із запропонованого діапазону змінювання параметрів.

Якісні параметри  $x_{ij}, j \in M$ , автори також пропонують описувати відповідним  $t$  лінгвістичним термом  $t = \overline{1, T}$  із множини термів  $T$ . Оберемо 3 лінгвістичних терма ( $T=3$ ): ( $\tau_1 - B$ ;  $\tau_2 - C$ ;  $\tau_3 - H$ ). Для  $T=3$  побудуємо графіки функцій належності, як зображено на рис. 4 [3].

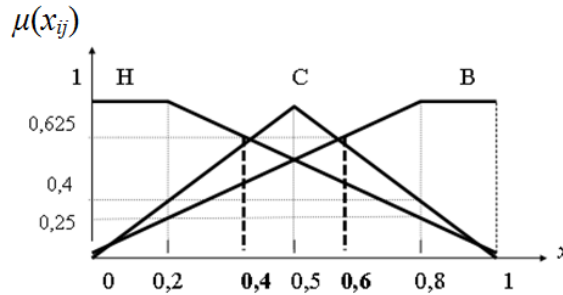


Рис. 4. Функції належностей для якісних оцінювальних параметрів

Виходячи з графіків функцій, значення  $\mu^t(x_{ij})$  будемо визначати таким чином. Якщо якісний параметр характеризується термом «низький», то значення функцій належності визначають при  $x = 0,2$ . При цьому  $\mu^H(0,2) = 1$ ;  $\mu^C(0,2) = 0,4$ ;  $\mu^B(0,2) = 0,25$ . Якщо якісний параметр описується термом «середній», то  $\mu^C(0,5) = 1$ ;  $\mu^H(0,5) = \mu^B(0,5) = 0,625$ . А для терму «високий» –  $\mu^H(0,8) = 0,25$ ;  $\mu^C(0,8) = 0,4$ ;  $\mu^B(0,8) = 1$ . Ці точні значення функцій належності отримані, виходячи з аналітичних виразів відповідних функцій при  $x = 0,2; 0,5; 0,8$ . Вся сукупність значень функцій належності для  $t=3$  наведена у табл. 2.  $\mu^H(x)$

Таблиця 2

Значення функцій належностей для  $t = 3$  для якісних параметрів

Терм	$\mu^H(x)$	$\mu^C(x)$	$\mu^B(x)$
H	1	0,4	0,25
C	0,625	1	0,625
B	0,25	0,4	1

Для визначення математичних виразів, що описують функції належності якісних параметрів, скористаємося рівнянням прямої. Виходячи з цього, отримаємо такі вирази для опису вигляду функцій належності:

$$\mu^H(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \in [0; 0,2]; \\ \frac{1-x_{ij}}{0,8}, & x_{ij} \in (0,2; 1]; \end{cases} \quad \mu^C(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{0,5}, & x_{ij} \in [0; 0,5]; \\ \frac{1-x_{ij}}{0,5}, & x_{ij} \in (0,5; 1]; \end{cases} \quad \mu^B(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{0,8}, & x_{ij} \in [0; 0,8]; \\ 1, & x_{ij} \in (0,8; 1]. \end{cases}$$

Процес оцінювання рівня якості підготовки випускників вишів на базі математичного апарату нечіткої логіки має містити механізм чіткого логічного висновку для визначення  $y_s, s = \overline{1, S}$ , на основі відповідної вихідної інформації. Тому необхідним етапом аналізу є формування матриць знань, які було складено для кожної  $f_i(x_{ij}), i = \overline{1, n}, j \in M$  для оцінювання належності значення функцій  $f_1 - f_s$  до вищеписаних термів  $\tau_i$  та отримання відповідних логічних рівнянь:

$$\mu^{\tau_1}(f_1) = \max_{r=1}^s \mu^{\tau_1} = \{ \min [\mu^{cr_1}_{j-1}(x_{1j})] \}; r = \overline{1, S}, j = \overline{1, S}$$

$$\mu^{\tau_2}(f_2) = \max_{r=1}^s \mu^{\tau_2} = \{ \min [\mu^{cr_2}_{j-1}(x_{2j})] \}; \mu^{\tau_3}(f_3) = \max_{r=1}^s \mu^{\tau_3} = \{ \min [\mu^{cr_3}_{j-1}(x_{3j})] \};$$

де  $r$  – номер рядку в множині значень для функції  $f_i, i = \overline{1, S}; j = \overline{1, S}$ .

$j$  – номер оцінювального параметру в підмножині параметрів  $x_{ij}$ , що визначають агрегуючу функцію  $f_i$ .

$$\mu^{\tau_4}(f_4) = \max_{k=1}^s \mu^{\tau_4} = \{ \min [\mu^{cr_4}_{j-1}(x_{4j})] \}; k = \overline{1, S}, \mu^{\tau_5}(f_5) = \max_{k=1}^s \mu^{\tau_5} = \{ \min [\mu^{cr_5}_{j-1}(x_{5j})] \};$$



де  $k$  – номер рядку в множині значень для  $f_k$ .

Отже, для оцінювання функції  $f_1$  – оцінювання рівня психофізичних якостей випускника – експертами було складено такі логічні рівняння, що визначають її рівень і набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned} \mu_{f_1}^{\bar{a}} &= \mu^{\bar{a}}(x_{11}, \dots, x_{17}) = \mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{a}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{a}}(x_{17}) \vee \\ &\mu_{f_1}^{\bar{c}} = \mu^{\bar{c}}(x_{11}, \dots, x_{17}) = \mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{c}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{c}}(x_{17}) \vee \\ &\mu_{f_1}^{\bar{h}} = \mu^{\bar{h}}(x_{11}, \dots, x_{17}) = \mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \\ &\mu^{\bar{h}}(x_{11}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{12}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{13}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{14}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{15}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{16}) \cdot \mu^{\bar{h}}(x_{17}) \vee \end{aligned}$$

У цих функціях знак « $\vee$ » позначає логічну операцію «АБО», а логічна операція «І» позначена « $\cdot$ ».

Тому при визначенні шуканого результату з логічного запису сукупності функцій належності, об'єднаних операцією І ( $\cdot$ ), обирається мінімальне значення, а серед сукупності функцій належності, об'єднаних операцією АБО ( $\vee$ ) – максимальне значення.

$$\text{Отже, } \mu^{r*}(f_1) = \max_{s=1}^8 \{ \min [ \mu^{r*}_{j=1} (x_{1j}) ] \}; r = \overline{1,6}$$

де  $r$  – номер рядку в множині значень для  $f_i$  функції, де,  $s = (1 - 3; 5 - 8)$ .

Аналогічні матриці знань та відповідні їм логічні рівняння складено для решти чотирьох функцій  $f_i$  ( $x_{ij}$ ).

Отже, процес оцінювання якості підготовки випускників технічних вишів складається з двох етапів.

На першому – засобами НЛ оцінюються лінгвістичні значення узагальнюючих функцій  $f_1 - f_5$ , що характеризуються трьома вищеописаними термами  $\tau_i \in (H, C, V)$ .

На другому етапі на основі нейронної мережі Хопфілда авторами статті визначається належність комбінації вхідних значень узагальнюючих функцій  $f_1 - f_5$  до одного з можливих вихідних рівнів якості підготовки випускників.

## ЕТАП 2. ПРОЦЕДУРА ФОРМАЛІЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ВИПУСКНИКІВ ВИШІВ НА БАЗІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА

Оскільки процес оцінювання якості підготовки випускників складається з двох етапів (перший – засобами НЛ оцінюються лінгвістичні значення узагальнюючих функцій  $f_1 - f_5$ , що характеризуються 3 вищеописаними термами  $\tau_i$ ), то на другому етапі на основі нейронної мережі Хопфілда авторами статті визначається належність якості підготовки до одного із можливих його рівнів.

На етапі 2 для визначення  $\mu^{s*}, s = \overline{1,3}$ , автори пропонують нейронну мережу Хопфілда, входами для якої є отримані на етапі 1 на базі НЛ лінгвістичні оцінки функцій  $f_i, i = \overline{1,5}$ . Виходячи зі специфіки роботи мережі Хопфілда, автори пропонують на її вхід подавати бінарні коди  $z_i$  («1» та «-1») значень функцій  $f_i, i = \overline{1,5}$ . Формат коду опишемо трьома цифрами, щоб закодувати 3 лінгвістичні терма: низький рівень функції  $f_i - (-1, -1, -1)$ ; середній рівень функції  $f_i - (-1, 1, 1)$ ; високий рівень функції  $f_i - (1, 1, 1)$ .

Запропонована мережа Хопфілда (рис. 5) дозволяє співставити образ вхідного вектора  $Z = (z_i)$ ,  $i = \overline{1,5}, L = 15$ , що описує коди значень функцій  $f_i, i = \overline{1,5}$ , із 3 еталонними зразками (табл. 3), обраними як найбільш типові з рядків логічних рівнянь, визначаючи найближчий еталонний вектор  $U = (u_i)$  (вихід системи).

Таблиця 3

Еталонні зразки для оцінювання рівнів  $y_s$  ( $s = \overline{1,3}$ )

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$y_s$
111	111	111	111	111	$y_1$
-111	-111	-111	-111	-111	$y_2$
-1-1-1	-1-1-1	-1-1-1	-1-1-1	-1-1-1	$y_3$

Таким чином, мережа ідентифікує той еталон, що є найбільш схожим із наявним серед вищеповисаних, а кожний еталон, у свою чергу, визначає певний рівень якості підготовки –  $y_s$ ,  $s = \overline{1,3}$

**РЕЗУЛЬТАТИ**

Після кодування мережа Хопфілда співставляє вхідний вектор, який характеризує рівень оцінки якості підготовки випускників вишів, з 3 еталонними зразками, наведеними в табл. 3, що складено на базі експертних даних.

На прикладі студентів-випускників спеціальності «Управління інформаційною безпекою» Вінницького національного технічного університету було на базі вищевикладеного підходу на основі нечіткої логіки отримано такі значення агрегуючих функцій  $f_i$ :  $f_1=C, f_2=B, f_3=C, f_4=B, f_5=B$ .

Представимо ці лінгвістичні оцінки функцій  $f_i$  відповідними кодами як вказано у табл. 4.

Таблиця 4

Значення  $f_i$  ( $i = \overline{1,5}$ )

Значення $f_i$	Кодування
$f_1=C$	-1 1 1
$f_2=B$	1 1 1
$f_3=C$	-1 1 1
$f_4=B$	1 1 1
$f_5=B$	1 1 1

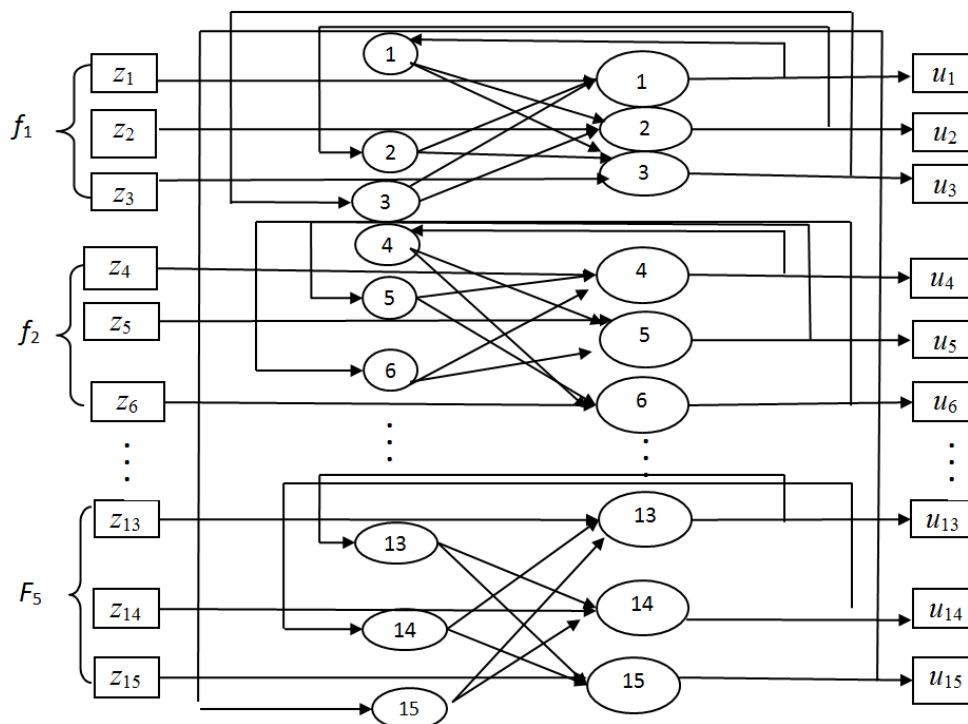


Рис. 5. Структура нейронної мережі Хопфілда для оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів

Реалізацію нейронної мережі Хопфілда було здійснено за допомогою математичного пакету MatLab 8.0. Отже, ідентифікацію рівня якості підготовки випускників вишів проілюструємо відповідним уривком з програми:

```
T= [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
    -1 1 1 -1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 1 1 1 1 1]
```



```

-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1];
net=newHop(T);
X={[-1 1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 1 1 1 1]};
[a,b,c]=sim(net, {1 1000}, {}, X);
a{1000}

```

Результат має вигляд:

```
ans = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]
```

Якщо порівняти отриманий еталон із табличними (табл. 4), то можна зазначити, що рівень якості підготовки студентів-випускників спеціальності «Управління інформаційною безпекою» Вінницького національного технічного університету відповідає значенню  $y_1$ , що є високим.

## ВИСНОВКИ

У статті запропоновано математичну модель та методи її формалізації, що дозволяють описати процедуру оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів, яка відображає множину вхідних параметрів на множину вихідних рішень, що ідентифікує результуюче. При цьому множина вхідних параметрів формується з основних елементів впливу на рівень якості підготовки випускників, які об'єднуються у блоки – агрегуючі функції  $f_i$ , що комплексно характеризують процедуру оцінювання ( $f_1$  – оцінювання рівня психофізичних якостей випускника –  $f_1 = f(x_{11}, \dots, x_{17})$ ;  $f_2$  – оцінювання рівня фундаментальної підготовки та професійних знань випускника –  $f_2 = f(x_{21}, \dots, x_{25})$ ;  $f_3$  – оцінювання рівня особистісних якостей випускника –  $f_3 = f(x_{31}, \dots, x_{37})$ ;  $f_4$  – оцінювання рівня професійних здібностей випускника –  $f_4 = f(x_{41}, \dots, x_{45})$ ;  $f_5$  – оцінювання рівня професійних навичок випускника –  $f_5 = f(x_{51}, \dots, x_{510})$ ).

Множина вихідних параметрів  $Y = (y_s)$ ,  $s = \overline{1, 3}$ , у свою чергу, дозволяє описати усі можливі рівні якості підготовки випускників ( $y_1$  – високий рівень якості підготовки випускника технічного вишу;  $y_2$  – середній рівень якості підготовки випускника технічного вишу;  $y_3$  – низький рівень якості підготовки випускника технічного вишу).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні методологічних засад оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів на базі математичного апарату штучного інтелекту та сучасних математичних автоматизованих засобів, зокрема, вперше запропоновано:

- математичну модель оцінювання рівня якості підготовки випускників технічних вишів та метод її формалізації, що, на основі математичних апаратів нечіткої логіки і нейронної мережі Хопфілда, дозволяє точно та адекватно, з мінімальними витратами часу відобразити множину вхідних параметрів впливу на множину результуючих рішень, враховуючи широке коло як кількісних, так і якісних чинників впливу для забезпечення комплексності та динамічності такого процесу;
- структурну модель оцінювання рівня підготовки випускників технічних вишів, яка засобами теорії систем дозволяє здійснити декомпозицію складної процедури оцінювання на послідовність елементарних компонент, ідентифікація яких стає чітко формалізованою;

## Література

1. Миллер Г. Магическое число сем плюс или минус два. Инженерная психология / Г. Миллер. – М.: Прогресс, 1964.
2. Щербак О. І., Софій Н. З., Бович Б. Ю. Теорія і практика оцінювання навчальних досягнень: Навчально-методичний посібник / За наук. ред. О. І. Щербак. – Івано-Франківськ, «Лілея-НВ», – 2014. – 136 с.
3. Азарова А. О. Математичні моделі ризику для систем підтримки прийняття рішень / Юхимчук С. В., Азарова А. О. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.
4. Азарова А. О. Математичні моделі оцінювання стратегічного потенціалу підприємства та прийняття рішень щодо його підвищення : монографія / А. О. Азарова, О. В. Антонюк. — Вінниця : ВНТУ, 2012. – 168 с.
5. Круглов В. В. Нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.

## References

1. Miller G. Magicheskoe chislo sem plus ili minus dva. Inzhenernaja psihologija / G. Miller. – М. : Progress, 1964.
2. Shherbak O. I., Sofij N. Z., Bovich B. Ju. Teorija i praktika ocinjuvannja navchal'nih dosjagnen': Navchal'no-metodichnij posibnik / Za nauk. red. O. I. Shherbak. – Ivano-Frankivs'k, «Lileja-NV», – 2014. – 136 s.
3. Azarova A. O. Matematichni modeli riziku dlja sistem pidtrimki prijnjtattja rishen' / Juhimchuk S. V., Azarova A. O. – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2003. – 188 s.
4. 4. Azarova A. O. Matematichni modeli ocinjuvannja strategichnogo potencialu pidpriemstva ta prijnjtattja rishen' shhodo jogo pidvishennja : monografija / A. O. Azarova, O. V. Antonjuk. — Vinnicja : VNTU, 2012. – 168 s.
5. Kruglov V. V. Nejronnye seti. Teorija i praktika / V. V. Kruglov, V. V. Borisov. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2002. – 382 s.

Рецензія/Peer review : 25.09.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф Азаров О.Д.

## МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОЇ ДІАГНОСТИКИ НАДІЙНОСТІ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ МОДУЛІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

Об'єктами представленого дослідження є корпуси модулів надвисоких частот спеціального призначення, зокрема тих, які використовуються в авіаційних, морських і наземних системах навігації, керування і захисту сучасних надзвукових літаків, військового, цивільного та подвійного призначення. В процесі експлуатації корпуси піддаються численним перепадам зовнішнього тиску та температури, що може призвести до їх розгерметизації. Випробування проводились на створеному стенді, який складається із термо-пневматичної, тензометричної та акустико-емісійної систем. Проведені випробування корпусів внутрішнім надлишковим тиском виявили розкид значень тиску розгерметизації, що свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації, зокрема лазерного зварювання та пайки. Застосування тензометричного та акустико-емісійних методів дозволили виявити характер напружено-деформованого стану корпусів і отримати інформативні параметри сигналів акустичної емісії, які були використані для розробки методу неруйнівного діагностування та прогнозування міцності і герметичності корпусів модулів надвисоких частот.

Ключові слова: герметичність, корпус, тензометрія, акустична емісія, деформація, напруження, тиск.

J. BOIKO, I. KOVTUN, S. PETRASHCHUK, O. KOVALCHUK

Khmelnytsky National University

## NONDESTRUCTIVE METHODS FOR HERMETIC SEAL RELIABILITY DIAGNOSTICS IN SUPER-HIGH-FREQUENCY MODULES

The research given in the paper is focused on the strength and hermetic seal of the super-high-frequency sealed electronic modules which are installed onboard of airplanes, rockets or other type of transport and hence exposed to harsh environment of atmospheric air pressure and temperature drops which are likely to cause their depressurization. The cases of modules are made from aluminum alloy AMG-2 and sealed either by welding or by soldering. The cases differ in sizes and design of the sealed joint. For conducting thermal and overpressure tests the test installation has been developed which represents the train made of the following parts: tensometry and acoustic emission instruments, which are connected to personal computer through the analog-to-digital converter and system, interface; thermal and pressure testing systems. The research methods performed by the test installation are: manometrical method for evaluating excessive pressure that causes depressurization; acoustic emission method for defect detection and monitoring when the object is under pressure or temperature impacts; tensometry method for measuring strain and estimating stress in objects with respect to excessive pressure; and bubble method for location of places of the hermetic seal damages. Analysis of stress and deflection of the tested cases, in particular their caps and seams, revealed the inherent character of deformation that may cause depressurization of the sealed joints when those sustain inner overpressure. Analysis of acoustic emission data received during tests revealed informative parameters applicable for nondestructive tests of strength and hermetic seal for modules subjected to overpressure and thermal impacts. The nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method has been developed for cases of super-high-frequency modules by acceptable inner overpressure and thermal test's in accordance to which the tested case complies with technological standard in specified pressure range if specified acoustic emission parameter does not exceed the acceptable limit, otherwise the case is rejected or its depressurization is predicted by predefined prediction factor.

Keywords: hermetic seal; case; tensometry; acoustic emission; strain; stress; overpressure.

### Вступ

Якість і надійність електронної апаратури забезпечується її конструкцією, технологією виготовлення і контролем її вихідних параметрів. Особливо це стосується техніки, яка використовується в авіації і космонавтиці, відмова якої може призвести до тяжких наслідків. Жорсткі умови експлуатації, зокрема широкий діапазон температур, знижений атмосферний тиск, вібрації і т.п., пред'являють до техніки підвищені вимоги.

Об'єктами представленого дослідження є корпуси модулів надвисоких частот (НВЧ) спеціального призначення, зокрема ті, які використовуються в авіаційних, морських і наземних системах навігації, керування і захисту сучасних надзвукових літаків, військового, цивільного та подвійного призначення. Електрична схема модуля монтується на об'єднувальній платі, яка розміщується в герметичному титановому, магнієвому, алюмінієвому або скляному корпусі [1, 2], кришки якого приварюють лазерним зварюванням або припаюють до основи, причому герметичність за швидкістю витіку гелію повинна складати не більше  $5 \cdot 10^{-2}$  Па·см<sup>3</sup>/с.

Під час лету та впродовж польоту на великій висоті зовнішній атмосферний тиск повітря, що оточує корпус, стає значно нижче атмосферного тиску на землі, який також знаходиться всередині корпусу. Таким чином корпус піддається дії внутрішнього

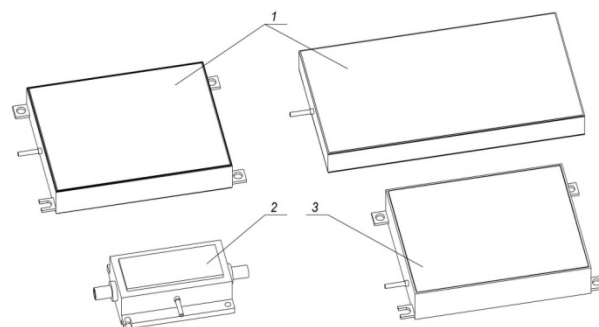


Рис. 1. Об'єкти дослідження: корпуси модулів НВЧ типу К (1), КМ (2), КБ (3)

тиску, який є надмірним в порівнянні із низьким зовнішнім. З урахування можливих перепадів температури цей внутрішній тиск може бути в 1,8 разу більше зовнішнього, і, розпираючи кришку і основу корпусу, може привести до деформацій останніх, зруйнувавши їх зварювальний шов або припій і привести до розгерметизації, а далі і до виходу модуля з ладу. Після посадки літака на землю значення зовнішнього тиску повертається до земного, тобто воно стає рівним внутрішньому, і навантаження що розпирало корпус зникає. При численних злетах і посадках літака корпуси піддаються знакозмінним навантаженням і можуть бути розгерметизовані через надмірні втомні напруження, що діють на матеріали корпусу та зварювальні або паяні шви. За технічними вимогами такі корпуси повинні витримувати не менше 100 зльотів і посадок (циклів), але далеко не всі корпуси витримують таку кількість циклів, і на практиці розгерметизація може статися на будь-якому з циклів.

Всі досліджені корпуси виготовлені із алюмінієвого сплаву АМГ-2 і відрізняються один від одного розмірами та конструкцією вузла герметизації (рис. 2).

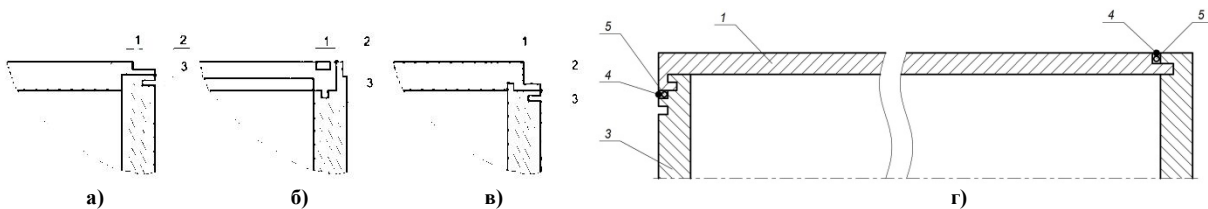


Рис. 2. Схеми вузлів герметизації корпусів модулів НВЧ першої групи:

1 – кришка; 2 – зварний шов; 3 – стінки корпусу; 4 – герметик Віксіт або паяний шов; 5 – дріт для розкриття

Досліджені типові схеми гермовузлів корпусів НВЧ представлені на рис. 2 а, б. У першій групі корпусів (типу К) герметизація досягається за допомогою лазерного зварювання місць стику кришки і основи, при цьому все навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається або повністю зварним швом (рис. 2, а), або зварним швом і конструкцією корпусу (рис. 2, б, в). У другій групі корпусів (типу КБ та КМ) (рис 2, г) герметизація місць стиків кришки і основи досягається за рахунок застосування герметика Віксіт (КБ-1) або припаюванням припоем (КБ-2, 3, 4, 5, КМ-1, 2, 6), для цієї групи корпусів навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається в основному конструкцією корпусу.

**Методи та способи контролю герметичності та міцності корпусів НВЧ**

При відборі методів контролю герметичності та міцності досліджуваних конструкцій необхідно враховувати їх придатність для поставлених умов випробувань: зміни температури від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , зміни надлишкового тиску від 0 до 10 атм, а також методів зварювання і пайки. Більшість методів неруйнівного контролю [3] не задовольняють умовам проведення досліджень через недостатню чутливість і малу точність вимірювань, громіздкість, високу вартість апаратури, економічну недоцільність, не відповідність до техніки безпеки і т.п.

Найбільш придатними для даної роботи є наступні методи: манометричний – дозволяє визначити величину надлишкового тиску, при якому відбувається розгерметизація виробу; бульбашковий – дозволяє виявити місця негерметичності; тензометрії – дає можливість контролювати рівень надлишкового тиску у виробі та вимірювати деформації для оцінки нормальних напружень в елементах конструкції виробу, які виникають в залежності та під дією надлишкового тиску; акустичної емісії (АЕ) – дає можливість виявляти дефекти у всьому об'ємі об'єкту дослідження при зміні внутрішнього тиску та слідкувати за динамікою їх розвитку. Комплексне використання перерахованих вище методів дозволяє, виконати необхідний обсяг досліджень з контролю герметичності корпусів НВЧ.

На рис. 3 представлено блок схему створеного стенду призначеного для випробування корпусів модулів НВЧ на міцність і герметичність в термокамері при надмірному тиску повітря.

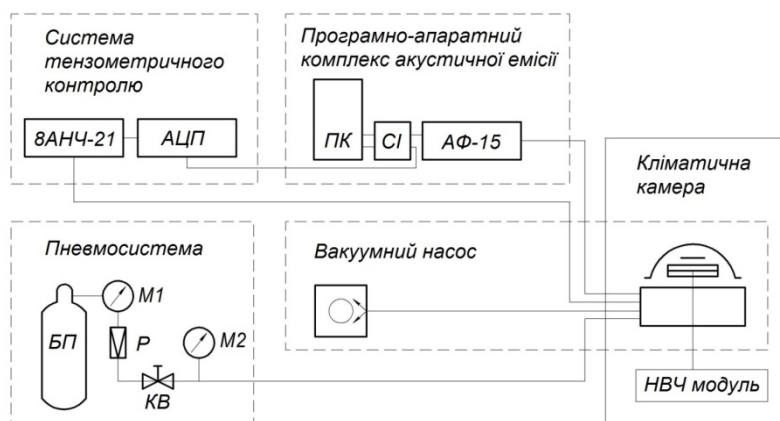


Рис. 3. Блок схема стенду експериментального для випробування герметичності корпусів модулів НВЧ

Блок схема стенду складається із двох функціональних комплексів апаратури: комплекс випробувальний; комплекс вимірювальний. Комплекс випробувальний призначений для здійснення тестового навантаження об'єктів дослідження під дією надмірного тиску та температури і складається із пневмосистеми, вакуумного насосу та кліматичної камери. Комплекс вимірювальний призначений для реєстрації та обробки матеріалів вимірювання деформацій та параметрів акустичної емісії складається із системи тензометричного контролю та програмно-апаратного комплексу акустичної емісії.

#### Випробування герметичності корпусів надвисоких частот із сумісним використанням методів електротензометрії та акустичної емісії

Корпуси були препаровані двома резонансними п'єзоелектричними датчиками розташованими на кришці біля коротких сторін з відстанню між ними в 100 мм для корпусів К-10 та К-12 і 80 мм – для корпусу К-11. Таке розташування п'єзодатчиків дозволяло утворювати лінійну антену і реєструвати лінійну координату джерел сигналів АЕ. Також корпуси були препаровані тензодатчиками, для реєстрації деформації та визначення напружень. Було встановлено 4 тензодатчики – 2 з вимірювальною базою 10 мм на кришках корпусів по середині перпендикулярно до довшої сторони, та 2 з вимірювальною базою 1 мм на швах вузлів герметизації модулів.

Препаровані корпуси приєднувались через трубку-штангель гнучким шлангом до установки для нагнітання повітря з метою створення надлишкового тиску. Виріб поміщався в термокамеру, де встановлювалась необхідна температура повітря (+20°C – для першої групи корпусів; +85°C – для другої) і підтримувалась незмінною протягом усіх циклів випробувань. На виріб встановлювався індикатор годинникового типу. Потім в досліджуваній корпус через трубку-штангель нагніталось повітря, створюючи надлишковий тиск усередині корпусу, послідовно доводячи його до  $P_{\text{тест}} = 1,6$  атм. Протягом навантаження проводився запис показань тензодатчиків і датчиків АЕ. На певних ступенях навантаження (через кожні 0,2 атм) записували показання індикатора годинного типу. Тривалість кожної ступені навантаження і витримка на ній становила не менше 1 хв. до зникнення сигналів АЕ. Для візуального контролю моменту втрати герметичності корпусом на кожній ступені навантаження здійснювали відсічення тиску краном відсічки і стежили за показаннями зразкового манометру на початку і в кінці витримки.

У разі зменшення показань манометра (втрати герметичності корпусу), а також після затримки при  $P_{\text{тест}} = 1,6$  атм здійснювали плавне зривання тиску в корпусі до  $P = 0$  атм із записом сигналів АЕ і тензодатчиків безперервно, і показань індикатора годинного типу дискретно при тисках 1,6; 1,4; 1,2; 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0 атм. Записували нульові показання апаратури, відключали її, і виймали зразок із термокамери для контролю герметичності. Після охолодження досліджуваного корпусу до кімнатної температури (+20°C) проводили контроль герметичності корпусу методом занурення у спирт при надмірному тиску 0,4 атм згідно з [4].

#### Аналіз напружено-деформованого стану корпусів надвисоких частот за результатами електротензометрування

Для обробки даних тензометрії і отримання достовірної інформації про вимірюванні деформації було проведено тарування використовуваних тензорезисторів за допомогою балки рівного опору до згину. Отримані амплітуди сигналів електротензометрії з урахуванням знаку були перераховані в значення одиниць відносних деформацій (ОВД). Далі у відповідності до закону Гука для лінійних деформацій [5, 6] значення відносних деформацій були використані для розрахунку нормальних напружень в корпусах та швах герметизації модулів. Значення модуля Юнга прийняті для розрахунку становили:  $E = 0,71 \cdot 10^5$  МПа – для матеріалу корпусів АМГ-2;  $E = 39,7 \cdot 10^5$  МПа – для паяного шву корпусу.

Згідно з технологічними вимогами до герметичності досліджуваних корпусів тиск розгерметизації має бути не нижче 1,6 атм. Випробування корпусів показали розкид значень тиску розгерметизації для корпусів одного і того ж типорозміру і конструкції, що свідчить про нестабільність технології процесу самої герметизації. Виявлені значення тиску розгерметизації лежали в межах: 1,0...3,5 атм (рис. 2, а); 4,8...5,76 атм (рис. 2, б); 1,0...2,2 атм (рис. 2, в). Приклади розгерметизації корпусів представлені на рис. 4.

Напруження визначені для матеріалів кришок та швів та прогин кришок корпусів мали схожий характер прояву для тестованих корпусів. Для прикладу на рис. 5 показані графічні залежності вказаних параметрів від внутрішнього надлишкового тиску корпусів.

Напруження на швах і кришках, отримані в результаті тензометрування досліджуваних корпусів, мають протилежні знаки (рис. 5). Позитивні напруження на кришках виробів свідчать про те, що вироби приймають джкоподібну форму, в результаті чого на зовнішніх волокнах зварних швів повинні виникнути напруження стиску (які мають знак «мінус»), що і підтверджується результатами тензометрування швів. Отримані графічні залежності демонструють, що при досягненні тиску розгерметизації напруження на швах досягають границі міцності матеріалу зварного шву (для АМГ-2  $\sigma_B = 200$  МПа  $\pm 30\%$ ), в той же час напруження на кришках – значно нижче. Враховуючи отримані знаки напружень, можна стверджувати, що розкриття швів починається із внутрішньої сторони шву. Частково

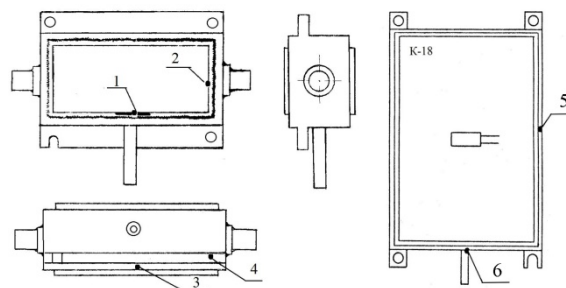


Рис. 4. Місця розгерметизації (1-6) корпусів модулів НВЧ



розкриттю шву перешкоджає шип-гребінь, виконаний в корпусах першої групи (рис. 2, а), що підтверджується деяким підвищенням тиску розгерметизації.

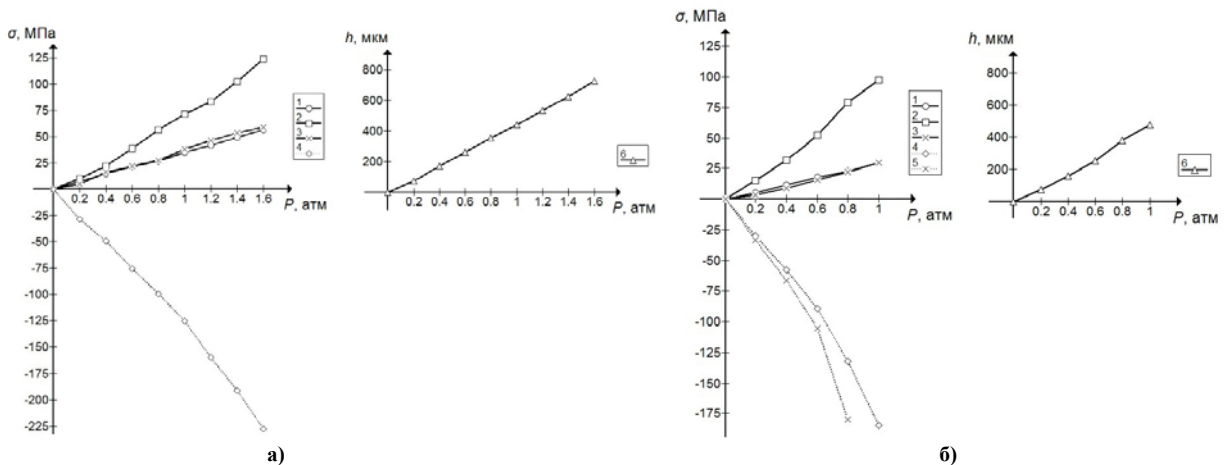


Рис. 5. Залежності напруження на кришках (1-3) і швах (4, 5) та прогину кришок (6) від надлишкового тиску корпусів К-7 (а) та К-9 (б)

### Аналіз акустико-емісійного вимірювання корпусів НВЧ

При підвищенні вимог до надійності і довговічності зварних конструкцій має передбачатися вдосконалення засобів діагностики якості зварних з'єднань, що піддаються впливу внутрішнього тиску. Одним з можливих перспективних методів діагностики та прогнозування працездатності корпусів модулів НВЧ виявився метод акустичної-емісії [7–11].

Дослідження надійності герметизації і міцності корпусів модулів НВЧ з використанням методу АЕ були виконані за допомогою системи збору та обробки даних в програмно-апаратному комплексі акустичної емісії (рис. 3). Обробка сигналів АЕ проводилася після завершення експерименту за спеціальними програмами, що дозволяють побудувати часові залежності параметрів процесу АЕ та лінійний розподіл джерел АЕ [12, 13].

Для кожного корпусу модулів побудовано наступні графіки: активності процесу АЕ; амплітуди подій АЕ; потужності процесу АЕ в одиницю часу; амплітудний розподіл сигналів АЕ; розподіл сигналів по координаті для лінійної антени; тривимірні діаграми активності, амплітуди і потужності. Для прикладу на рис. 5 представлені графіки зазначених параметрів акустичної емісії, отримані при випробуванні корпусу К-10.

Як видно із представлених матеріалів, найбільш значний рівень сигналів АЕ мав місце при тиску 0,8 атм: амплітуда перевищила 400 мкВ, активність – 125 імп/с, енергія  $E = 3 \cdot 10^{-10}$  мкВ<sup>2</sup>·с та потужність  $W = 0,7 \cdot 10^{-9}$  мкВ<sup>2</sup>. Це значення тиску, при якому напруження в корпусі і звареному шві ще далекі від граничних, тобто є безпечними для міцності конструкції, і може бути прийнято в якості діагностичного  $P_{пр}$ . Якщо після цього взяти відношення тиску розгерметизації до контрольного діагностичного, то можна отримати деяке число, яке назвемо коефіцієнтом прогнозування:

$$K = \frac{P_{zp}}{P_{пр}} \tag{1}$$

З огляду на те, що руйнування шва відбулося при  $P_{гр} = 2$  атм, коефіцієнт прогнозування граничного (руйнівного) тиску для корпусу типу К-10:  $K_{10} = 2 / 0,8 = 2,5$ .

Аналіз отриманих матеріалів АЕ та коефіцієнтів прогнозування дозволяють зробити висновок про потенційну можливість використання методу АЕ для неруйнівного контролю якості зварювання модулів і для діагностування їх граничного (руйнівного) тиску. За діагностичний або контрольний тиск можна вибирати такий, щоб був безпечним для міцності конструкції, зокрема щоб напруження в зварному шві не перевищували  $0,5\sigma_B$ , і при якому має місце значний прояв всіх або деяких параметрів сигналів АЕ. При цьому можна знайти і в подальшому використати коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації тестованих корпусів.

Звичайно, коефіцієнт прогнозування тим більше, ніж при менших навантаженнях в порівнянні з руйнівними робиться прогноз або проводиться неруйнівний контроль. Але, очевидно, прогнозування буде надійніше, якщо воно ведеться за аналізом сигналів АЕ, отриманих за весь період навантаження до навантажень, найближчих до граничних. На практиці, доцільно вибирати порогове навантаження за результатами обробки статичних матеріалів випробувань партії однотипних виробів. Як видно з наведених графіків (рис. 6), число подій (АЕ) при збільшенні внутрішнього надлишкового тиску безперервно зростає аж до руйнування, проте реєстрація сигналів починається не з нуля, а з деякого тиску (0,4 атм – К-10; 0,6 атм – К-12; 0,8 атм – К-11), що з однієї сторони є однією з ознак відсутності перешкод при записі АЕ, а з іншої – характеризує якість зварного шва.

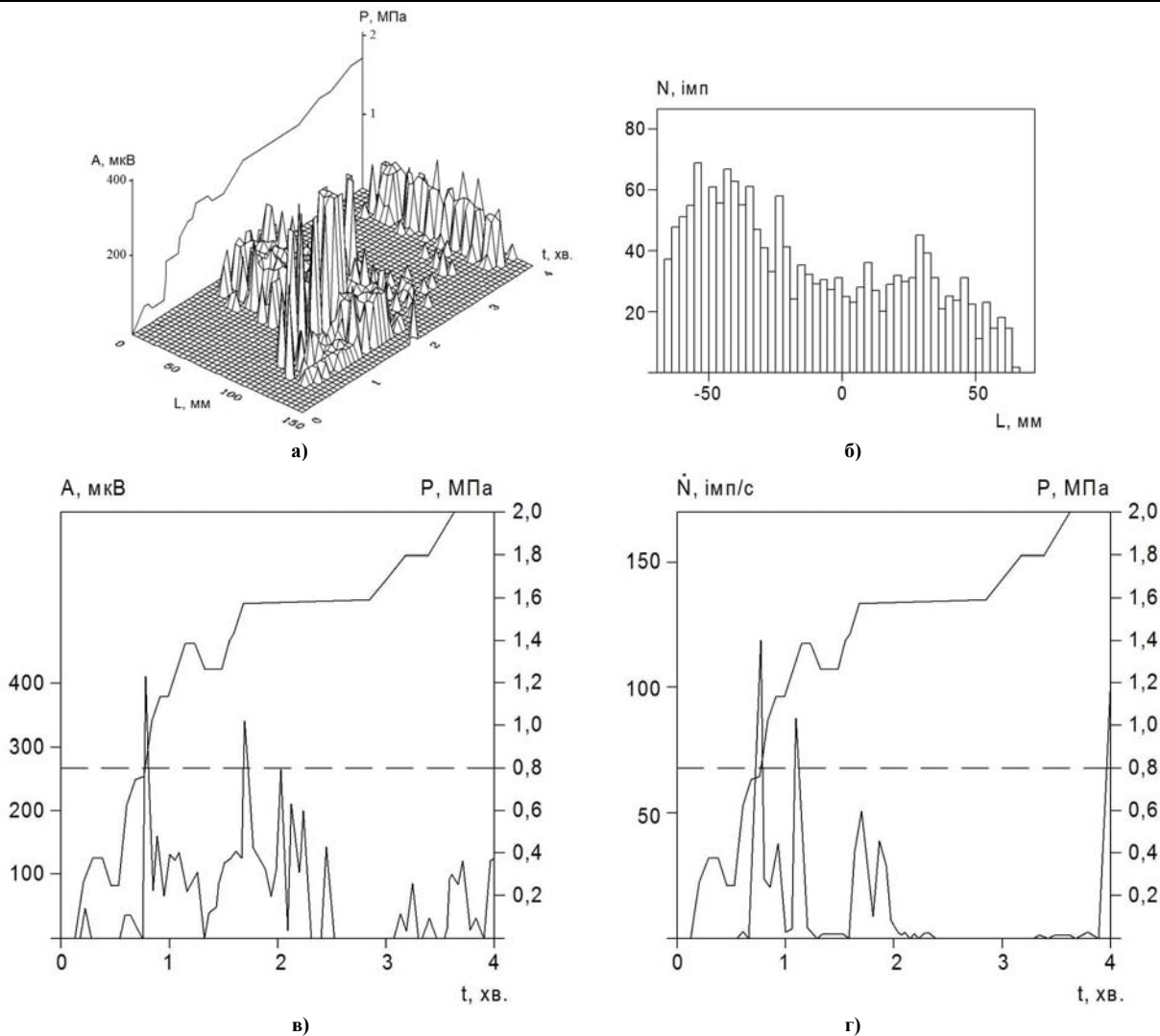


Рис. 6. Параметри акустичної емісії зареєстровані під час випробування корпусу К-10: а) тривимірна діаграма амплітуди подій АЕ; б) розподіл сигналів по координаті для лінійної антени; в) часова залежність амплітуди подій АЕ; г) часова залежність активності подій АЕ

**Розробка методики неруйнівного діагностування та прогнозування міцності і герметичності корпусів надвисоких частот**

При аналізі матеріалів експериментів для призначення надійного тиску прогнозування працездатності корпусів розглядалися значення середньої амплітуди на певній ступені навантаження та загальна сума подій і осциляцій накопичених за весь час до розглянутого тиску. На рис. 7 представлені залежності такого параметру як сумарний рахунок подій АЕ від внутрішнього надлишкового тиску.

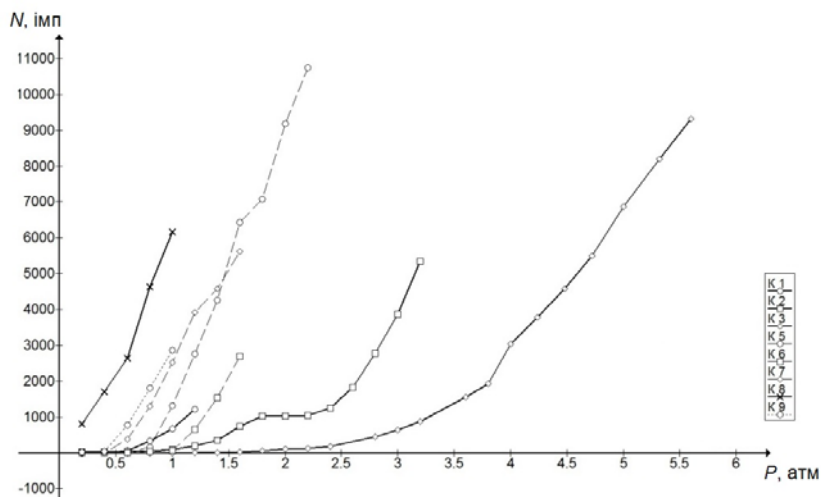


Рис. 7. Залежність сумарного рахунку подій від внутрішнього надлишкового тиску в корпусах типу К

Отримані значення сумарного рахунку сигналів АЕ в залежності від внутрішнього надлишкового тиску тестованих корпусів та коефіцієнти прогнозування тиску розгерметизації, можуть бути використані для визначення, тобто прогнозування тиску розгерметизації при безпечному навантаженні корпусів.

Прогнозований тиск розгерметизації визначається за формулою:

$$P_{\max}^{np} = P_{npz} \cdot K, \quad (2)$$

де  $P_{npz}$  – тиск, при якому сумарний рахунок сигналів АЕ досягає порогового значення,  $K$  – коефіцієнт прогнозування.

Значення коефіцієнтів прогнозування випробуваних корпусів лежать в межах 2-2,53. Цей розкид отриманих значень, відображає нестабільність фізико-механічних характеристик зварних швів, і є наслідком недосконалості технології лазерного зварювання. У цій ситуації, враховуючи особливу відповідальність тестованих корпусів (експлуатація на борту літака), для прогнозування тиску розгерметизації необхідно приймати мінімальне значення коефіцієнта прогнозування  $K_{\min}=2$ , тоді можлива помилка в прогнозуванні увійде в запас міцності.

Тепер для організації неруйнівного діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ необхідно визначити безпечний рівень тиску тестування корпусів. Використовуючи мінімальне значення коефіцієнта прогнозування, тиск тестування буде розраховуватись по формулі:

$$P_{\text{тест}} = \frac{P_{\max(TY)}}{K_{\min}}, \quad (3)$$

де  $P_{\max(TY)}$  – значення внутрішнього надлишкового тиску, який повинен витримати корпус за ТУ.

Неруйнуюче навантаження корпусу до  $P_{\text{тест}}$  дає можливість за параметрами сигналів АЕ оцінювати міцність і герметичність тестованих корпусів.

Запропонована методика неруйнівного діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ складається з наступних етапів:

1. Діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів модулів НВЧ проводиться при неруйнівному тестуванні корпусів внутрішнім надлишковим тиском. Стисле повітря подається всередину корпусу до досягнення тиску тестування  $P_{\text{тест}} = P_{\max(TY)} / K_{\min}$ , де  $P_{\max(TY)}$  – граничний внутрішній надлишковий тиск корпусів за ТУ,  $K_{\min}$  – коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації ( $K_{\min} = 2$ ). Під час випробування здійснюється одночасна реєстрація тиску і параметрів сигналів АЕ.

2. Якщо при навантаженні до  $P_{\text{тест}}$  виникла акустична емісія, сумарний рахунок якої перевищив пороговий рівень (15 імп), корпус визнається непридатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тиску; при необхідності його тиск розгерметизації визначається за формулою  $P_{\max}^{np} = P_{npz} \cdot K_{\min}$ , де  $P_{npz}$  – тиск, при якому активність сигналів АЕ досягла порогового рівня.

3. Якщо сумарний рахунок АЕ не перевищив пороговий рівень, корпус вважається придатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тиску.

### Висновки

Створено стенд тестування герметичності корпусів модулів надвисоких частот, який складається із двох комплексів – випробувального, призначеного для здійснення навантаження об'єктів дослідження під дією надмірного тиску та температури, та вимірювального, який складається із системи тензометричного контролю та програмно-апаратного комплексу акустичної емісії, призначеного для реєстрації та обробки деформацій та параметрів акустичної емісії.

Проведені випробування корпусів модулів надвисоких частот під дією внутрішнього надлишкового тиску виявили розкид значень тиску розгерметизації, що свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації, зокрема лазерного зварювання та пайки.

Аналіз напружено-деформованого стану випробуваних корпусів модулів надвисоких частот, зокрема кришок та швів, виявив характер деформації останніх, в якому саме напруження на швах досягають границі міцності матеріалу зварного шву і спричиняють розгерметизацію гермо-вузлів під впливом внутрішнього надмірного тиску.

Розроблено неруйнівний акустико-емісійний метод діагностики та прогнозування герметичності корпусів модулів надвисоких частот, в якому придатність корпусів до експлуатації в заданому робочому діапазоні тиску визначається за умови не перевищення порогового рівня інформативного параметру сигналів акустичної емісії, в протилежному випадку корпус відбраковується, або за необхідністю визначається прогнозований тиск розгерметизації за попередньо визначеним коефіцієнтом прогнозування.

### Література

1. John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince and Wataru Nakayama. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability. New York: McGraw-Hill Professional, 1998, 496 p.
2. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene and K. Pilkauskas “Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components”, МЕCHANIKA, vol. 22(6): 2016, pp. 489–494. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.

3. M. Balasko, E. Svab and G. Endrczy “Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, issue: 1, Feb. 2005, pp. 330–333.
4. State Industrial Standard GOST 20.57.406–81. Complex quality control. Production of electronics. Testing methods. M.: Standard inform, 1982. 133 p.
5. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – 2 вид. – К., 2004, 655 с.
6. Ройзман В. П. Опір матеріалів / В. П. Ройзман. – Львів : Афіша, 2004. – 108 с.
7. V. Emamian, Zhiqiang Shi, M. Kaveh and A.H. Tewfik “Acoustic emission classification using signal subspace projections”, in *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference, Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001.
8. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk “Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules”. 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Proceedings of a meeting held, 20–24 Feb. 2018, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 776–780. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336314.
9. J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design. First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017): Proceedings of a meeting held, 29 May-2 June 2017. Kiev, Ukraine, 2017. P. 514–517. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
10. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. 2018. Vol. 182. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
11. Kovtun. Acoustic emission application for nondestructive strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *Вісник Хмельницького національного університету = Herald of Khmelnytskyi National University*. Технічні науки : наук. журн. – Хмельницький, 2018. – № 1. – С. 12–17.
12. F. Tonolini, A. Sala, G. Villa. (1987). General review of developments in Acoustic Emission methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 28(1-5), pp. 179–201. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(87\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0308-0161(87)90075-5).
13. W. Carter Ralph, Gregory L. Daspit, Andrew W. Cain and others, “Acoustic emission detection of BGA components in spherical bend”, in *2013 Proc. IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conf.*, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 208–213. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575573.

#### References

1. John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince and Wataru Nakayama. *Electronic packaging: design, materials, process, and reliability*. New York: McGraw-Hill Professional, 1998, 496 p.
2. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Bauriene and K. Pilkauskas “Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components”, *MECHANIKA*, vol. 22(6): 2016, pp. 489–494. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
3. M. Balasko, E. Svab and G. Endrczy “Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, issue: 1, Feb. 2005, pp. 330–333.
4. State Industrial Standard GOST 20.57.406–81. Complex quality control. Production of electronics. Testing methods. M.: Standard inform, 1982. 133 p.
5. Pysarenko H. S. Opір materialiv / H. S. Pysarenko, O. L. Kvitka, E. S. Umanskyi. – 2 vyd. – K., 2004, 655 s.
6. Roizman V. P. Opір materialiv / V. P. Roizman. – Lviv : Afisha, 2004. – 108 s. V. Emamian, Zhiqiang Shi, M. Kaveh and A.H. Tewfik “Acoustic emission classification using signal subspace projections”, in *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference, Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001.
7. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk “Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules”. 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Proceedings of a meeting held, 20–24 Feb. 2018, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 776–780. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336314.
8. J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design. First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017): Proceedings of a meeting held, 29 May-2 June 2017. Kiev, Ukraine, 2017. P. 514–517. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
9. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. 2018. Vol. 182. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
10. Kovtun. Acoustic emission application for nondestructive strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Herald of Khmelnytskyi National University*. Tekhnichni nauky : nauk. zhurn. – Khmelnytskyi, 2018. – № 1. – С. 12–17.
11. F. Tonolini, A. Sala, G. Villa. (1987). General review of developments in Acoustic Emission methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 28(1-5), pp. 179–201. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(87\)90075-5](https://doi.org/10.1016/0308-0161(87)90075-5).
12. W. Carter Ralph, Gregory L. Daspit, Andrew W. Cain and others, “Acoustic emission detection of BGA components in spherical bend”, in *2013 Proc. IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conf.*, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 208–213. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575573.

Рецензія/Peer review : 8.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.  
Прорецензовано редакційною колегією



В.П. РОЙЗМАН, І.І. КОВТУН, О.К. БІЛИК  
Хмельницький національний університет

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДРОТЯНИХ МАЛОБАЗНИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДІЙСНИХ ЗНАЧЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Метою представлено дослідження є забезпечення завадостійкості дротяних малобазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки, які виникають під дією технологічних факторів та умов експлуатації. Для дротових тензорезисторів було виявлено технологічні та конструктивні фактори, що впливають на тензочутливість і спричиняють похибку вимірювання деформацій. Виявлено вплив температури на точність вимірювання деформації і запропоновано способи температурної компенсації. Створено установку для визначення допустимого струму живлення тензорезисторів. Експериментально встановлено допустимі значення струму живлення, відповідні допустимій зміні відносного опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення при збереженні чутливості апаратури, для тензорезисторів з різними базами, наклеєних на різні матеріали.

Ключові слова: електротензометрія, тензорезистор, деформація, напруження, електронний компонент, завадостійкість.

V.P. ROYZMAN, I.I. KOVTUN, O.K. BILYK  
Khmelnitskyi National University

## PROVIDING MEASUREMENT STABILITY FOR SMALL-BASE WIRE STRAIN GAUGES APPLIED TO ELECTRONIC COMPONENTS

The research represented in the paper is aimed at providing measurement stability for small-base wire strain gauges applied to measure strain of electronic components as those are exposed to external forces present in technological and operational conditions. The wire strain gauges were inspected in order to identify technological and design factors, that effect their gauge factor and cause measurement errors. The identified factors are governed by such properties of the gauges as physical and theological, fatigue strength, and shape and geometry. For the wire gauges the temperature effect that distorts strain measurement accuracy is defined and the thermal compensation methods are introduced to provide for using thermal compensation circuit, combined strain resistors and auto-compensation strain resistors. The experimental installation was designed to assess threshold limit level for the supply current of the strain gauges. The threshold supply current is limited by threshold of gauge mesh heating temperature, whose value is defined by amount of heat extracted by the current and also cooling conditions. The cooling conditions, in turn, depend on size of the material inspected and its thermal conduction, area occupied by the gauge mesh, ratio of wire surface to its volume, glue layer and its thermal conduction, environmental temperature and other factors. By using designed experimental installation the threshold limit levels for the supply current of the strain gauges were obtained with account for and in compliance with acceptable changes of gauge resistivity, caused by heating from supply current, and strain gauge factor retained for various sizes of strain gauges and various materials strain gauges are attached to for inspection.

Keywords: electrotensometry, strain gauge, strain, stress, electronic components, measurement stability.

### Постановка проблеми

Тенденція до зниження ваги та отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки привела до того, що такі вироби, які володіють високими електронними характеристиками, виявились не достатньо механічно міцними. В наслідок дії статичних та динамічних статичних та динамічних навантажень елементи їх конструкцій руйнуються, що приводить до відмов окремих вузлів або апаратури в цілому. В зв'язку з цим проблема забезпечення механічної міцності стала в один ряд з традиційними задачами надійності в електроніці [1]. Важливим етапом рішення цієї проблеми є розробка нових та вдосконалення існуючих методів та засобів експериментального дослідження міцності і руйнування, які повинні застосовуватись при проектуванні, випробуванні та експлуатації електронної техніки.

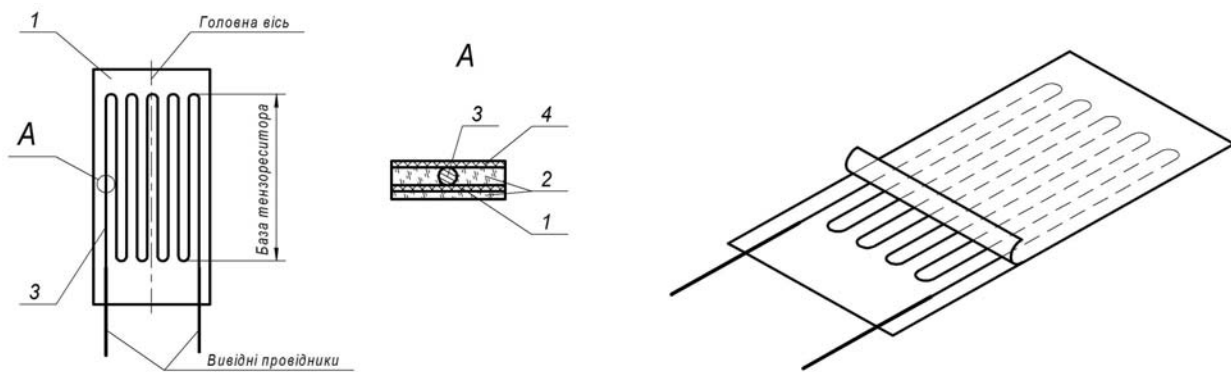
Методи вимірювання, що застосовуються для оцінки напружено-деформованого стану об'єктів, можна розділити на наступні групи: рентгенівські, поляризаційно-оптичні, муарових смуг, крихких покриттів, гальванічних покриттів і тензометрії [2–4]. Кожен з методів володіє певними перевагами і недоліками і призначений для використання в конкретних умовах. Проте, зважаючи на специфіку виробів електроніки, найбільш широке вживання для дослідження напружено-деформованого стану може отримати, після відповідного доопрацювання, метод електротензометрії [4, 5].

Електротензометрія відноситься до електричного методу вимірювання деформацій. Електричний метод засновано на заміні механічних величин електричними. Найбільш розповсюдженим пристроєм для перетворення неелектричних величин в електричні є тензорезистор опору. В теперішній час в експериментах широко використовуються дротяні, фольгові та напівпровідникові тензорезистори [4, 5] (тензодатчики). Хоча принцип їх дії ідентичний. Їх переваги: можливість виміру деформацій одночасно для великої кількості точок, різні розміри бази, можливість дистанційного виміру. Однак, використання тензорезисторів вимагає вирішення низки методологічних завдань, виконання спеціальних вимог та технологічних правил, отримання навиків та умінь при роботі з датчиками і апаратурою.

### Тензочутливість дротяних тензорезисторів

В основу роботи тензорезисторів покладена властивість матеріалів (провідників) при їх розтягу або

стиску змінювати свій опір пропорційно існуючій деформації. Тому за зміною опору тензорезистора, наклеєного на деталь, можна визначати і саму деформацію. Дротяний датчик (рис. 1) являє собою тонкий петлеподібний, укладений на паперову основу дріт, що має товщину від 15 до 30 мкм. До кінців утвореної таким чином решітки приварені або припаяні виводи (провідник більшого перерізу) для підключення тензорезистора до апаратури.



1 – паперова або лакова підкладка; 2 – зв’язуючий шар; 3 – тензочутливий елемент; 4 – захисний елемент

Рис. 1. Дротяний тензорезистор

Зміну питомого опору провідника датчика при виникненні деформації розтягу або стиску називають тензорезистивним ефектом, який характеризується тензочутливістю і визначається за формулою [6]:

$$k = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho \cdot l}{\rho \cdot \Delta l}, \quad (1)$$

де  $\Delta R/R$  – відносна зміна опору;  $\varepsilon = \Delta l/l$  – відносна деформація деталі в місці наклеювання датчика;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\Delta \rho/\rho$  – відносна зміна питомого опору.

На величину цього коефіцієнта істотно впливають фізичні властивості матеріалів. Для матеріалів, що використовуються в тензорезисторах, величина  $k$  знаходиться в межах 2 .. 3,5: константан – 2,0 .. 2,1, ніхром – 2,1 .. 2,3, елінвар – 3,2 .. 3,5.

У дротяного датчика через заокруглення на кінцях петель виникає похибка вимірювання, пов’язана з бічною чутливістю, або чутливістю до поперечних деформацій:

$$\Delta R/R = k\varepsilon_x + S\varepsilon_y, \quad (2)$$

де  $k$  та  $S$  – коефіцієнти тензочутливості у поздовжньому та поперечному напрямках;  $\varepsilon_x$  та  $\varepsilon_y$  – відносні деформації у напрямках осей  $X$  та  $Y$ , де  $X$  – поздовжній напрям тензодатчика;  $Y$  – поперечний напрям тензодатчика.

Коефіцієнт тензочутливості датчика у поздовжньому напрямку через поперечну чутливість виявляється дещо нижчим ніж коефіцієнт тензочутливості датчика, який виготовлений з відрізка проволочки без заокруглень. Зі збільшенням бази датчика, тобто його довжини, ця різниця зменшується і для найбільш використовуваних тензорезисторів з базою 20 і навіть 10 мм – досить мала. Для датчиків з базою 1 чи 3 мм, величина  $S$  вже спів-розмірна зі значенням коефіцієнта тензочутливості  $k$  і повинна враховуватись при визначенні напружень.

Цього недоліку позбавлені тензорезистори, які виконані у вигляді одиночної нитки. Крім цього, провідники для тензометричних датчиків повинні мати великий питомий опір  $\rho$ , щоб отримувати датчики з малою базою для дослідження деформацій; добре приварюватись і паятись; не мати гістерезису для відтворюваності вимірів; характеризуватись постійним коефіцієнтом тензочутливості. Наприклад, у константановій проволочці він не змінюється, аж до його руйнування.

При прискореному навантаженні деталі з наклеєним дротяним тензорезистором і подальшою витримкою при постійному навантаженні зареєстроване початкове, після навантаження, значення відносної деформації з плином часу зменшується на декілька відсотків і потім за асимптотичним законом наближається до певного значення. Цей процес пов’язаний з явищем повзучості, коли деформації суттєво залежать від тривалості навантаження. Про такі матеріали говорять, що вони мають реологічні властивості.

Вигляд кривої повзучості тензорезисторів типу ПЗ-3Ц та П10-6Ц наведений на рис. 2, де на вертикальній осі відкладена відносна зміна опору тензорезистора  $dR$  (%), а на горизонтальній – час (год).

Однією із найважливіших характеристик тензорезисторів, що сприймають змінні деформації, є їх втомна міцність, тобто властивість витримувати при заданій деформації певне число циклів навантаження без пошкодження чутливого елемента резистора або інших деталей датчика. Так, наприклад, тензорезистори типу П10-6 з розвантажувальною петлею в місці приєднання чутливого елемента до вивідного провідника, при змінному навантаженні і деформацією  $\varepsilon = 10^{-3}$  що здійснювалась із частотою  $\nu = 50$  Гц, відпрацювали без руйнування більше  $10^8$  циклів. При цьому, після відпрацювання  $10^8$  циклів, спостерігалась зміна коефіцієнта тензочутливості тензорезистора в межах  $\pm 0,1$  %.

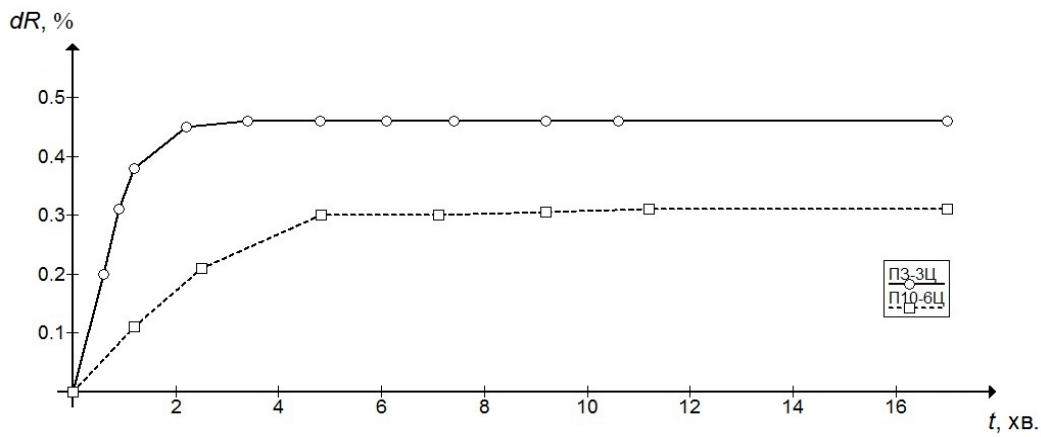


Рис. 2. Криві повзучості тензорезисторів

Вплив температури на точність вимірювання деформації тензодатчиком

У зв'язку з тепловим розширенням досліджуваної деталі і провідника тензорезистора, а також зміною опору тензорезистора від температури, необхідно відрізнити деформацію, яка реєструється при дії на досліджувану деталь тільки температурного впливу від деформації, викликані зовнішніми зусиллями. При зміні температури деталі, в місці наклепки тензорезистора на  $\Delta T$ , відносна деформація його дроту змінюється на  $\Delta l_p/l = \alpha_1 \Delta T$ , а відносна деформація деталі на довжині бази тензорезистора – на  $\Delta l_s/l = \alpha_2 \Delta T$ . Температурний коефіцієнт опору дроту (або фольги) тензорезистора змінюється на  $\Delta R/R = \gamma \Delta T$  і тоді загальна зміна опору тензорезистора буде дорівнювати [5]:

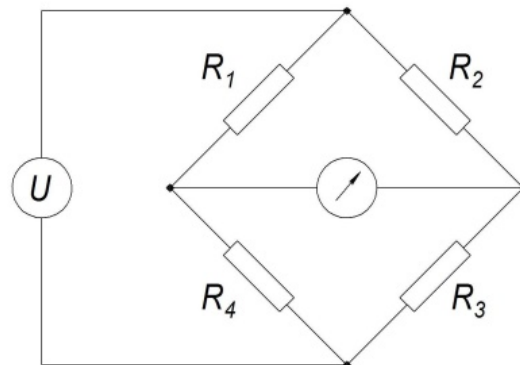
$$\Delta R/R = [(\alpha_2 - \alpha_1)S + \gamma] \Delta T, \tag{3}$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти температурного розширення матеріалу тензорезистора і деталі відповідно;  $\gamma$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу тензорезистора;  $S$  – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора.

При відмінностях коефіцієнтів температурного розширення деталі  $\alpha_1$  і тензорезистора  $\alpha_2$ , можна фіксувати уявну (фіктивну) деформацію  $\epsilon_f = (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$ , яка еквівалентна деякій деформації від зовнішніх впливів, і поєднується з реальною деформацією і якщо не вжити спеціальних заходів, то можна отримати результати, які містять суттєві помилки.

При вимірюванні, вплив температури можна виключити наступними методами:

1. Використовуючи схему з температурною компенсацією (рис. 3). Два тензорезистори з однаковими параметрами вмикаються в різні плечі моста, при цьому активний тензорезистор сприймає дію зовнішніх сил і температури, а компенсаційний – тільки дію температури. Тензорезистори включені в різні плечі моста – цим і досягається термокомпенсація.



$R_1$  – активний тензорезистор;  $R_2$  – компенсаційний тензорезистор;  $R_3, R_4$  – резистори моста  
Рис. 3. Схема температурної компенсації

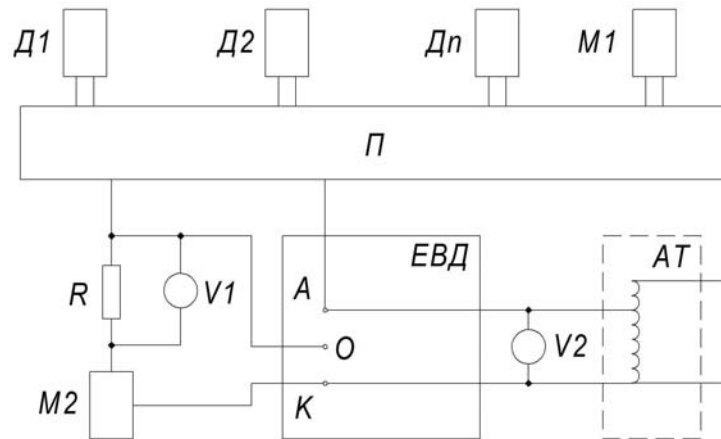
2) Компенсація за рахунок комбінованого тензорезистора. У цьому випадку ефект термокомпенсації досягається наступним чином. Чутлива решітка тензорезистора виготовляється з мікродроту з різними за знаком температурними коефіцієнтами  $\beta_1$  та  $\beta_2$ . Оперуючи довжиною відрізків  $l_1$  та  $l_2$  можна виготовити тензорезистори, термокомпенсовані для різних матеріалів.

3) Використовуючи самокомпенсовані тензорезистори. Для цього типу тензорезисторів термокомпенсація на певному діапазоні температур досягається шляхом підбору мікродроту з заданими електрофізичними параметрами. Якщо відомий закон зміни температури і температурна характеристика тензорезистора, то застосовують різні пристрої вводу корегування в показники датчика.

Визначення допустимої величини струму живлення тензорезисторів

Гранична величина струму живлення для тензорезисторів обумовлена допустимою температурою

нагріву решітки, величина якої визначається кількістю тепла виділеного струмом та умовами охолодження. Умови охолодження залежать від розмірів деталі і її теплопровідності, площі поверхні, яку займають нитки решітки, відношення поверхні дроту до його об'єму, товщини клейового шару і його теплопровідності, температури навколишнього середовища і ряду інших факторів. Для визначення допустимої величини струму живлення була зібрана спеціальна установка, схема якої наведена на рис. 4.



Д1-Дn – тензорезистори типу МПТ, КФ4ПІ; М1, М2 – магазини опору МСР-60М; П – перемикач П10; ЕВД – електронний вимірювач деформацій; V1 – мікрвольтметр В3-57; V2 – цифровий вольтметр В7-57; R – точний (прицезійний) опір 10 Ом  $\pm 0,05\%$ ; АТ – автотрансформатор ЛАТР-5-0-250V

Рис. 4. Блок-схема установки для визначення допустимого струму живлення тензорезисторів

За допомогою перемикача П в активне плече електронного вимірювача деформації (ЕВД), в якості якого застосовувалася тензостанція 8АНЧ-26) включався магазин опорів М1 або один з досліджуваних тензорезисторів Д1-Дn. Значення опорів на магазинах М1, М2 підбиралися приблизно рівними опору тензорезисторів. Автотрансформатором АТ встановлювалася певна напруга живлення мостової схеми ЕВД. За допомогою мілівольтметра V1 вимірювали падіння напруги на еталонному опорі  $R = 10$  Ом, який включено послідовно з досліджуваним тензорезистором і розраховували струм живлення тензорезисторів.

Нульові показники ЕВД відраховувались на протязі від 3 до 5 с після включення тензорезистора. Подальший відлік показань по ЕВД проводили через 1, 3, 5, 10, 12 хв. За отриманими даними будували графіки залежності зміни опору тензорезисторів у часі при встановленому струмі живлення. Для прикладу на рисунку 6, а представлені залежності зміни відносного опору  $\Delta R/R$  або «фіктивної» деформації  $\epsilon_{\phi}$  тензорезисторів типу МПТ з різними базами, наклеєними на керамічний зразок, а на рисунку 5, б – та ж залежність, але для тензорезисторів закритих 15-міліметровим шаром епоксидного компаунду.

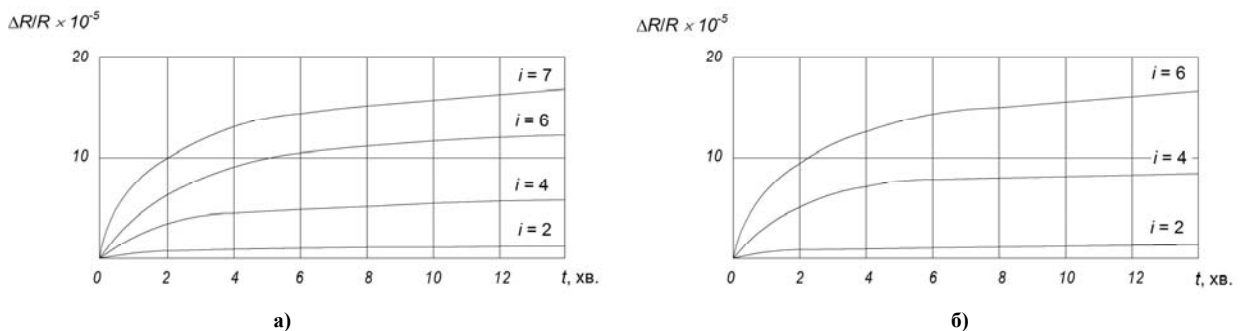


Рис. 5. Залежність зміни відносного опору тензорезисторів з базою від 0,5 до 3 мм, опором 100 Ом, виготовлених з мікродроту діаметром 4 мкм, від величини струму живлення і часу виміру, при монтажі тензорезисторів: а) на поверхні зразка; б) під шаром компаунда

Допустиму величину струму живлення тензорезисторів встановлювали, виходячи з роздільної здатності тензоапаратури і величини мінімальних передбачуваних деформацій. На підставі цієї вимоги припустима зміна опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення дорівнює  $\epsilon_{\kappa} = 1 \cdot 10^{-5}$  одиниць відносної деформації. Відповідні їй допустимі значення струму живлення, визначені зазначеним способом, для різних матеріалів наведені в таблиці 1.

Ці ж значення струмів живлення придатні для інших матеріалів з близькими до кераміки теплофізичними характеристиками (склопластики, скло, компаунди).

Таблиця 1

**Допустимий струм живлення тензорезисторів, наклеєних на кераміку (скло, компаунд)**

Параметр тензорезистора			Допустимий струм живлення тензорезисторів, наклеєних на зовнішній поверхні зразка, мА	
Опір, Ом	База, мм	Діаметр дроту, мкм	Без компаунда	Під шаром компаунда
50–300	0,5–3	4	2	1,9
50	5	30	16,2	14,2
100	5	15	6,6	5,8
100	5	20	9,44	7,7
100	10	15	7	6
100	10	20	10	8
100	10	30	18	15

**Висновки**

Для дрових тензорезисторів виявлено технологічні та конструктивні фактори, що впливають на тензочутливість і спричиняють похибку вимірювання малобазних тензодатчиків, зокрема їх фізичні властивості, геометрична форма, реологічні властивості та втомна міцність матеріалів.

Для дрових тензорезисторів виявлено вплив температури на точність вимірювання деформації і запропоновано способи температурної компенсації використовуючи схему з температурною компенсацією, компенсацію за рахунок комбінованого тензорезистора, самокомпенсовані тензорезистори.

Завдяки використанню розробленої установки було експериментально встановлено допустимі значення струму живлення, відповідні допустимій зміні відносного опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення при збереженні чутливості апаратури, для тензорезисторів з різними базами, наклеєними на різні матеріали.

**Література**

1. С.Т. Robertson, "Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics", Prentice Hall, 2003.
2. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський. – К. : Вища школа, 1993. – 655 с.
3. Clarke, C. Eberhardt Microscopy Techniques for Materials Science – CRC Press, 2002. – 424 p.
4. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. D. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel "MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures", Optics and Lasers in Engineering, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций / В.А. Мехеда – Самара : СГАУ, 2011. – 56 с.

**References**

1. T. Robertson, "Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics", Prentice Hall, 2003.
2. Pisarenko G.S. Strength of materials / G.S. Pisarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umanski – K.: High school, 1993. – 655 P.
3. Clarke, C. Eberhardt Microscopy Techniques for Materials Science – CRC Press, 2002. – 424 p.
4. Levshina E.S. Electrichekie ismereniya phisicheskikh velichin / E.S. Levshina, P.V. Novitsky – L.: Energoatomizdat, 1983. – 320 P.
5. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel "MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures", Optics and Lasers in Engineering, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Mekheda V.A. Tensometry method for strain measurement / V.A. Mekheda – Samara: SGAU, 2011. – 56 p.

Рецензія/Peer review : 20.10.2018 р.

Надрукована/Printed :22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

## ОГЛЯД СИСТЕМ ВЕБ-АНАЛІТИКИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГУ

У роботі проведено дослідження систем веб-аналітики інтернет-маркетингу. Показані кейси рекламних агентств з управління ефективністю онлайн-маркетингу. Перераховано обставини, що ускладнюють аналіз ефективності інтернет-реклами та сформульовані рекомендації, що дозволяють долати ці труднощі. Розглянуто випадки, через які ускладнюється аналіз ефективності інтернет-реклами: інформація про рекламу, відвідувачів і клієнтів прийнято переглядати і аналізувати в тих джерелах, які цю інформацію формують; дані збираються у величезних обсягах, і мають складність в структурі; незважаючи на велику кількість даних, що збирається, зазвичай не вистачає для управління ефективністю всередині кожного рекламного каналу, інструменти веб-аналітики дозволяють оцінювати ефективність підприємств по інтернет-маркетингу тільки в разі переходу користувачів на просуний сайт.

**Ключові слова:** ефективність інтернет-реклами, веб-аналітика, Google analytics, конверсія, спліт-тестування.

O.V. SYKHOVETSKYI, R.O. BAHRIY, T.K. SKRYPNYK  
Khmelnitsky National University

### REVIEW OF WEB-ANALYTICS SYSTEMS FOR EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF INTERNET MARKETING

The article describes the main indicators of the online advertising efficiency. The web analytics systems make it possible to collect and analyze information about the visitors of Internet resources. In-stalling the counters of analytical systems in websites, advertisers are able to track customers at all stages, from the click on an advertisement to the payment of an order in the Internet store. The analysis of online advertising efficiency is usually complicated for the following reasons: information on advertising, visitors and customers is viewed and analyzed in those sources which form this information; the data are collected in large volumes, and have a complex structure; despite the large amount of data, collected information is usually not enough for efficiency management within each advertising channel; a large number of parameters affects the efficiency indicators; it takes time for a person to make a decision about buying something; in web analytics systems there is no information on the history of customer relations; web analytics tools enable you to assess the efficiency of internet marketing activities only in the case of transition of users to a promoted website. The investigation of modern state of web analytics and the review of the main indicators of Internet advertising effectiveness are presented in this article. Google Analytics, the most popular web analytics system, is analyzed. Considered cases that complicate the analysis of the effectiveness of Internet advertising.

**Keywords:** internet advertising efficiency, web analytics, google analytics, conversion, split-testing.

**Вступ.** У статті розглянуті основні показники ефективності інтернет-реклами. Описано можливості найпопулярнішої системи веб-аналітики від Google. Перераховано обставини, що ускладнюють аналіз ефективності інтернет реклами і сформульовані рекомендації, що дозволяють долати ці труднощі. Веб-аналітичні системи дають можливість збирати і аналізувати інформацію про аудиторію інтернет-магазину чи звичайного сайту.

Основна проблема аналізу ефективності інтернет-маркетингу зазвичай ускладнюється через наступні випадки: інформацію про рекламу, відвідувачів і клієнтів прийнято переглядати і аналізувати в тих джерелах, які цю інформацію формують; дані збираються у величезних обсягах, і мають складність в структурі; незважаючи на велику кількість даних, що збирається зазвичай не вистачає для управління ефективністю всередині кожного рекламного каналу; на показники ефективності впливає велика кількість параметрів; для ухвалення рішення про покупку людині зазвичай потрібен час.

У зв'язку з цим сформовано наступні рекомендації для аналізу ефективності інтернет-реклами. Необхідно налаштувати збір в єдину базу даних інформації з рекламних систем. У момент реєстрації відвідувача на сайті необхідно, крім його особистих даних (e-mail, телефон), зберігати в базі також дані про всі рекламні джерела, які до моменту реєстрації приводили цього відвідувача на сайт. Перед запуском основної рекламної кампанії необхідно проводити мало бюджетні тестові кампанії для попередньої оцінки ефективності.

**Метою роботи** є дослідження ефективності прискорення роботи систем веб-аналітики інтернет-маркетингу. Аналіз можливостей системи веб-аналітики Google analytics. Показані кейси рекламних агентств з управління ефективністю онлайн-маркетингу. Перераховано обставини, що ускладнюють аналіз ефективності інтернет-реклами та сформульовані рекомендації, що дозволяють долати ці труднощі.

**Показники відстеження відвідувачів сайту.** Одним з найпоширеніших інструментів є встановлення лічильників аналітичних систем на сайт, таким чином рекламодавці мають змогу відстежувати відвідувачів на всіх етапах, починаючи від кліка по рекламі до оплати замовлення в інтернет-магазині. В Україні широко поширені дві системи веб-аналітики: Google analytics (GA) та Яндекс метрика. Однак більш гнучкою і зручною однозначно є система веб-аналітики GA. Розглянемо більш детально її можливості. Google analytics дозволяє відстежувати майже всі показники, серед яких є такі базові, що характеризують відвідувачів сайту:

1. Відвідування. Нове відвідування починається в тому випадку, якщо користувач не проявляє

активність на сайті протягом деякого часу (за замовчуванням 15 хвилин). Нове відвідування також починається опівночі. Таким чином, якщо користувач протягом дня перебуває на сайті з тривалими перервами, система GA зареєструє кілька відвідувань.

2. Перегляд сторінок – кількість завантажень сторінок сайту, в тому числі і повторні завантаження, одразу записуються в базу.

3. Унікальні відвідувачі – кількість різних браузерів, комп'ютерів і мобільних пристроїв, використаних відвідувачами для перегляду сайту, для цього використовуються сесії.

4. Кількість сторінок, переглянутих за відвідування, тобто відношення кількості завантажених сторінок до кількості відвідувань сайту. Високі значення цього показника можуть свідчити про підвищений інтерес користувачів до сайту. Однак іноді велика кількість перегляду сторінок сигналізує про те, що користувачам просто доводиться відкривати безліч сторінок сайту для виконання необхідної їм функції, або пошуку потрібної інформації.

5. Показник відмов – відношення кількості відмов до загальної кількості відвідувачів сайту. Відмовою вважається ситуація, коли відвідувач прийшов на сайт, переглянув одну сторінку, і не вчинив на сайті ніяких дій [1]. Високий показник відмов свідчить про те, що багато відвідувачів не вивчають більше однієї сторінки сайту. Це може бути пов'язано з тим, що на цій сторінці відсутня необхідна їм інформація або навпаки, вони знайшли те що хотіли і далі не продовжують працювати з сайтом.

Подібний перелік показників також використовується в інших системах веб-аналітики та є достатнім для ефективнішої роботи інтернет-маркетингу.

Для збору інформації в системі GA є можливість налаштувати наступні типи цілей:

1. Час перебування на сайті. Цільовими будуть вважатися ті відвідування сайту, тривалість яких перевищить час вказаний рекламодавцем.

2. Кількість сторінок, переглянутих за відвідування. Цільовими будуть вважатися ті відвідування, протягом яких буде переглянуто більшу кількість сторінок, ніж вказав рекламодавець.

Одним з основних показників ефективності в інтернет-маркетингу є коефіцієнт конверсії (CR), який обчислюється, як відношення кількості конверсій (досягнень цілей) до всіх відвідувань сайту. Як показник ефективності також часто використовуються витрати на досягнення однієї конверсії (відношення затрат на рекламний канал до кількості конверсій з цього рекламного каналу). Ці показники цікаві тим, що вони можуть бути застосовані практично до будь-яких типів сайтів. Чим вище коефіцієнт конверсії, тим частіше відвідувачі сайту реалізують поставлені рекламодавцем цілі.

Але якщо мова йде про інтернет-магазин, коефіцієнт конверсії не може бути головним показником ефективності, оскільки він не завжди корелює з чистим прибутком. Розглянемо результати двох рекламних кампаній (рис. 1). Якщо судити за коефіцієнтом конверсії (CR), обчислюваним як відношення кількості продажів до кількості відвідувачів, то кампанія РК2 більш ефективна у порівнянні з кампанією РК1. Однак, ми побачимо, що це не так, якщо звернемо увагу на основні показники ефективності в інтернет-магазинах: чистий прибуток (NP) і коефіцієнт повернення інвестицій (ROI). Чистий прибуток обчислюється як різниця між прибутком від рекламної кампанії (Profit) і витратами на її проведення (Costs). У свою чергу, прибуток Profit можна приблизно обчислити, як добуток кількості продажів, середнього чека і середньої маржинальності товарів, що продаються. Коефіцієнт повернення інвестицій ROI обчислюється, як відношення чистого прибутку NP до витрат Costs. У табл. 1 показано, що в результаті проведення кампанії РК1, на кожен вкладений в рекламу рубль був отриманий додатково майже рубль чистого прибутку. У той же час кампанія РК2 виявилась збитковою, витрати на її проведення перевищують отриманий з неї прибуток.

Таблиця 1

Показники ефективності рекламних кампаній

РК	Кількість відвідувачів	Кількість продажів	CP, %	Середній чек, грн.	Маржинальність, %	Profit, тис. грн.	Costs, тис. грн.	NP, тис. грн.	ROI, %
РК1	20000	40	0,2	4000	30	48	25	23	92
РК2	30000	210	0,7	1000	7	14,7	20	-5,3	-26,5

В Google analytics подібний аналіз можна виконати за допомогою інструменту Електронна торгівля. Це модуль системи GA, який передає дані про транзакції з системи управління контентом інтернет-магазину на сервера Google analytics. Найчастіше роботу з ведення рекламної кампанії та аналізу її ефективності виконує не штатний працівник рекламодавця, а зовнішнє агентство інтернет-маркетингу. У цих випадках рекламодавець, як правило, не бажає розкривати дані про прибуток, і тоді агентство для оцінки ефективності реклами змушене використовувати деякі проміжні ключові показники ефективності KPI (Key Performance Indicators), узгоджені з рекламодавцем. Найчастіше, головним KPI є прийнятна для клієнта вартість заявки або вартість замовлення CPO (cost Per Order). Приклади оцінки ефективності реклами на основі проміжних KPI часто демонструються digital-агентствами на конференціях, присвячених інтернет-бізнесу. Розглянемо, наприклад, представлений на форумі РИФ + КІВ кейс агентства AdLabs [3]. Клієнтом агентства в даному



випадку був інтернет-магазин електроніки. Для кожної групи товарів клієнт повідомив агентству прийнятну цільову вартість замовлення (табл. 2). У міру ходу реклами, представники агентства визначили фактичну вартість замовлення. В результаті деякі кампанії (наприклад, по годинах і побутової техніки) були визнані неефективними, оскільки за період їх проведення фактичними СРО (Cost per order) перевищувала цільову (див. табл. 2). Однак за деякими кампаніями відвідувачі продовжували приходити на сайт і здійснювати замовлення ще протягом кількох місяців після відключення реклами, і з урахуванням цих відкладених продажів, фактична СРО знижувалася до прийнятного для рекламодавця рівня.

Таблиця 2

**Показники, що використовуються для управління ефективністю рекламних кампаній**

Кампанія	Відвідування	Замовлення	Коефіцієнт конверсії, %	Витрати, тис. грн.	Фактична СРО, грн.	Цільова СРО, грн.
Ноутбуки	6361	106	1,67	27,8	262,3	800
Телефони	5129	99	1,93	31,3	316,2	600
Автоелектроніка	4133	87	2,11	21,2	243,7	300
Годинники	3746	20	0,93	13,2	660	300
Побутова техніка	3238	20	1,52	15,1	755	500

Були проаналізовані не тільки згруповані за категоріями товарів рекламні кампанії, але також окремі ключові слова всередині цих кампаній. З рекламою по неефективним ключовим словам (таким, наприклад, виявилися слова *bosch* і *gorenju*) виконувалася додаткова робота, зокрема, уточнювалось фокусування показів оголошень на цільову аудиторію і перевірялась релевантність цільових сторінок, на які оголошення вели відвідувачів. Ефективність деяких ключових слів підвищувати не вдавалося, і для цих слів доводилося знижувати ставки за клік, або взагалі відключати покази оголошень. Крім оцінки ефективності систем веб-аналітики, агентства інтернет маркетингу також займаються аналізом просування сайтів [5, 6]. Особливо аналізу потребують цільові сторінки сайтів, через які проходять відвідувачі, починаючи від переходу по рекламному оголошенню, і закінчуючи оформленням замовлення. Неякісно виконані цільові сторінки можуть істотно знижувати ефективність інтернет-реклами, навіть у тому випадку, якщо на просувний сайт приходить виключно цільова аудиторія. Для аналізу цільових сторінок, найчастіше, використовується спліт-тестування, яке полягає в наступному. За допомогою дизайнерів і програмістів для цільової сторінки створюється кілька альтернативних варіантів. Весь потік відвідувачів сайту розділяється в заданих пропорціях між поточною цільовою сторінкою і її альтернативними варіантами. Таким чином, одні відвідувачі сайту проходять через поточну версію цільової сторінки, а інші відвідувачі – через альтернативні варіанти цільової сторінки. Далі тестовані варіанти цільової сторінки порівнюються між собою по кількості цільових дій, скоєних. Кращим визнається той варіант цільової сторінки, проходячи через який відвідувачі найкраще конвертуються в клієнтів. цей метод дозволяє істотно підвищувати ефективність інтернет-реклами. Наприклад, агентству iMedia вдалося на 79% збільшити кількість замовлень на сайті шляхом більш яскравого уявлення знижки і обмеження терміну її пропозиції [5].

**Ускладнення ефективності інтернет-реклами.** Аналіз ефективності інтернет-реклами зазвичай ускладнюється через наступні випадки.

1. Інформацію про рекламу, відвідувачів і клієнтів прийнято переглядати і аналізувати в тих джерелах, які цю інформацію формують. Наприклад, дані про витрати переглядають в акаунтах рекламних систем (Яндекс.Директ, Google AdWords); дані по поведінку відвідувачів на сайті у акаунтах лічильників веб-аналітики; дані про дзвінки в офіс в системах колл-трекінгу; В результаті всі ці дані розглядаються окремо і виявляються досить слабо пов'язані один з одним. Дані збираються у величезних обсягах і мають складну структуру. Незважаючи на велику кількість даних, що збирається зазвичай не вистачає для управління ефективністю всередині кожного рекламного каналу.

2. Для прийняття рішення про покупку людині зазвичай потрібен час. Перед тим, як оформити замовлення, користувач неодноразово приходять на просувний сайт з різних рекламних каналів. Причому один і той же користувач може відвідати сайт з різних комп'ютерів, планшетів, смартфонів. Тому в багатьох випадках не вдається виявити всі джерела, які раніше привели покупця на сайт. Таким чином, рекламодавець втрачає багато інформації про ефективність джерел відвідувачів.

У зв'язку з цим сформовано наступні рекомендації для аналізу ефективності інтернет-реклами:

1. Необхідно налаштувати збір в єдину базу даних інформації з рекламних систем, лічильників веб-аналітики, систем колл-трекінгу і систем управління взаємовідносинами з клієнтами. У момент реєстрації відвідувача на сайті необхідно, крім його особистих даних (e-mail, телефон), зберігати в базі також дані про всі рекламні джерела, які до моменту реєстрації привели цього відвідувача на сайт. Перед запуском основної рекламної кампанії необхідно проводити малобюджетні тестові кампанії для попередньої оцінки ефективності.

2. Якщо оцінку ефективності виконує зовнішнє агентство, і рекламодавець не бажає відкривати підряднику дані про свої продажі, то необхідно використовувати вартість цільових дій. Наприклад, інтернет-магазин може відкрити агентству доступ до даних про переходи відвідувачів на сторінки "Спасибі за замовлення". Факт кожного відвідування такої сторінки свідчить про оформлення замовлення, але не є



гарантією його подальшої оплати. Однак рекламодавець має статистику за коефіцієнтами конверсії замовлень в покупки і може використовувати цю інформацію для розрахунку цільової вартості неоплаченого замовлення.

**Висновки.** Системи веб-аналітики дозволяють збирати і аналізувати інформацію про відвідувачів інтернет ресурсів. Встановлюючи лічильники аналітичних систем на свої сайти, рекламодавці отримують можливість відстежувати клієнтів на всіх етапах, від кліка по рекламному оголошенню до оплати замовлення в інтернет-магазині. В даній статті досліджено сучасний стан веб-аналітики інтернет-маркетингу та розглянуті основні показники ефективності інтернет-реклами. Проаналізовано найпопулярнішу систему веб-аналітики Google Analytics.

### Література

1. Веб-аналітика для інтернет-реклами [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.youtube.com/watch?V=mj1bz0ol8KQ>
2. Оцінка ефективності реклами в інтернеті [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.youtube.com/watch?v=joyhWvQjXbQ>
3. Відстеження ефективності кожної площадки партнерської мережі Бігуна [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.youtube.com/watch?v=Bw9FpidhUf8>
4. Проведення Спліт-тестування. Кейси, які працюють у всіх [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.youtube.com/watch?v=Xw8iFQcfRnQ>
5. Веб-аналітика для інтернет-магазинів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://video.yandex.ru/users/icontextru/view/4>
6. Спліт тестування: корисні поради [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://video.yandex.ru/users/icontextru/view/2>

### References

1. Veb-analytika dlia internet-reklamy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.youtube.com/watch?V=mj1bz0ol8KQ>
2. Otsinka efektyvnosti reklamy v interneti [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.youtube.com/watch?v=joyhWvQjXbQ>
3. Vidstezhennia efektyvnosti kozhnoi ploshchadky partnerskoi merezhi Bihuna [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.youtube.com/watch?v=Bw9FpidhUf8>
4. Provedennia Split-testuvannia. Keisy, yaki pratsiuut u vsikh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.youtube.com/watch?v=Xw8iFQcfRnQ>
5. Veb-analytika dlia internet-mahazyniv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://video.yandex.ru/users/icontextru/view/4>
6. Split testuvannia: korysni porady [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://video.yandex.ru/users/icontextru/view/2>

Рецензія/Peer review : 4.10.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Сорочатий Р.В.

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, Е.Ю. ВЖЕЩ  
Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

*Синхронний двигун знайшов своє застосування в системах керування та різноманітних двигунах. Проте, двигун на постійних магнітах недостатньо описаний в сучасній літературі. В роботі представлено аналіз роботи моделі синхронного двигуна на постійних магнітах та його системи керування.*

*Ключові слова: синхронний двигун, Matlab, Simulink.*

S.L. HORIASHCHENKO, K.L. HORIASHCHENKO, E.U. VJESCH  
Khmelnitsky National University

### MODEL OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS IN MATLAB

*Motors utilize a lot of power in the whole world. Reducing of power consumption required not only for high-power motors like for factory's motors. On other side low-power motors are very common for personal use. Main types of home-type motors are asynchronous.*

*Synchronous motor with permanent magnets (PMSM) is known long time. In Ukraine this type of motor does not used wide enough. Synchronous motors require less power to provide enough work as well known asynchronous motor. It is shown what PMSM require control hardware to provide rotor soft start, movement and stop. Three control schemas known for now. But only encoder control gives adequate start of synchronous motor. In article it is shown model of control with encoder with variable load. PMSM allow to archive constant speed rise, fast reaction of rotor load. Output torque of PMSM automatically adjusted with supply voltage and current with stable rotations.*

*In article it is shown*

*Keywords: synchronous motor, control, encoder.*

### Вступ

Зростання у всьому світі уваги до захисту навколишнього середовища, збереження енергії та інших видів ресурсів призвело до зростання уваги екологічності не тільки промислового обладнання, а також і домашнього обладнання. Зрозуміло, що домашні пристрої володіють значно меншими енергетичними показниками. Проте широке розповсюдження побутової техніки вимагає інтенсивного аналізу в цій області. Частка енергоспоживання побутового обладнання складає за різними оцінками до 40% від сукупної потужності, що виробляється різними технічними засобами.

Розвиток систем автономного енергоспоживання за рахунок таких джерел, як сонячна енергія, енергія вітру або гідроелектроенергетика ставить необхідним зменшення потужності обладнання при збереженні такого ж рівня корисних властивостей. Одним з найбільших споживачів енергії в побутових приладах є двигун. В широко розповсюджених асинхронних двигунах не використовується інтелектуальні системи керування, а також є недосяжними механічних показники, такі як:

- 1) високі механічний момент на роторі двигуна, в тому числі на низьких обертах;
- 2) висока щільність потужності на об'єм двигуна.

В синхронних двигунах досяжна зміна швидкості у широких межах.

Змінна швидкість обертання використовується в сучасних побутових пристроях, таких як холодильники та пральні машини, в різноманітних міксерях. В цих пристроях характерні низькі швидкості обертання та високий момент під час старту та початку роботи. Техніки виявлення позиції ротору для цих систем дозволяють отримати високі показники працездатності. Електронні керовані трифазні контролери забезпечують досягнення високих показників ефективності.

Вперше у кінці 1960-х років було представлено векторне керування (або так зване керування полем) для асинхронних двигунів. Застосування цієї новітньої технології дозволило отримати швидкий відгук в тяговому зусиллі, яке порівняне з машинами постійного струму. На кінець 2018 року техніки керування отримали широке застосування та стали широко застосовуваними у великій кількості рішень.

Для векторного керування синхронних машин потрібна інформація щодо позиції ротора. Зазвичай позиція ротору визначається позиційним енкодером, резольвером або сенсорами на ефекті Хола. За цією технологією датчик обертання встановлено безпосередньо на роторі без додаткових елементів передачі обертів. Одночасно з цим потужність передається безпосередньо на робочий пристрій. В результаті така концепція дозволила отримати швидкий динамічний відгук за тягою та одночасно зменшити акустичний шум, зменшити рівень вібрації, а також досягти суттєвого зменшення споживаної потужності, що призвело до суттєвого зростання часу роботи системи.

До особливостей таких систем слід віднести високе значення механічної тяги при нульовій швидкості або "утримання" ротору. Також особливою властивістю є постійна потужність при широкій зміні діапазону швидкостей. А тому синхронний двигун на постійних магнітах має працювати не тільки на номінальній швидкості, а також забезпечувати сталу потужність і на більших швидкостях.

### Основна частина

Отже, для забезпечення параметрів роботи побутової техніки використовуються як однофазні, так і трифазні двигуни.

До класичних двигунів відносяться:

- однофазні асинхронні двигуни;
- однофазні універсальні двигуни.

До сучасних двигунів відносяться:

- трифазні асинхронні двигуни;
- трифазні синхронні двигуни.

Серед синхронних двигунів, синхронний двигун на постійних магнітах є єдиним варіантом трифазної машини. Статор такого двигуна має класичні трифазні обмотки. В роторі синхронного двигуна постійні магніти виконують таку ж саму дію, як і в класичній синхронній машині. Їх створення стало можливим за рахунок створення нових магнітних матеріалів, в тому числі із застосуванням рідкоземельних матеріалів.

Синхронний двигун на постійних магнітах володіє цілим рядом переваг для створення сучасної системи керування рухом. Використання постійних магнітів для створення потужного магнітного потоку в повітряному зазорі між ротором та статором дозволяє отримати високоефективний синхронний двигун на постійних магнітах.

Як відомо, в синхронному двигуні швидкість обертання визначається швидкістю обертання поля статора, яка називається синхронна швидкість. Синхронна швидкість  $\omega_s$  визначається частотою живлення статора  $f_s$ , та кількістю полюсних пар  $p$ . Статор трифазної синхронної машини має зазвичай обмотки за синусоїдальним законом розподілу.

Коли ротор двигуна збуджується трифазною напругою живлення, виникає магнітне поле, що обертається в одну або іншу сторону залежно від порядку вхідних фаз. Приймається, що магнітне поле також розподілено за синусоїдальним законом розподілу.

Швидкість обертання  $N$  (синхронна швидкість) визначається (1).

$$N = \frac{120f_s}{P}, \quad (1)$$

де  $f_s$  – частота змінної напруги, Гц;  
 $P$  – кількість полюсів;

### Проблеми запуску синхронного двигуна

У випадку синхронного двигуна на постійних магнітах, одна з принципових проблем – початок руху з невідомої позиції. Початок руху за невідомої позиції ротору може призвести до певного оберненого руху ротору до моменту співпадіння полів ротору та статора. Зі зростанням потужності двигуна це може призвести навіть до пошкодження двигуна або до проблем з стартовими струмами. Такий стан є неприйнятним для багатьох випадків застосування. Так, якщо синхронний двигун використовується за умов первинного навантаження на ротор, наприклад для кухонних ліфтів, це може призвести до пошкодження не тільки двигуна, але й механізму в цілому, не кажучи за пошкодження вантажу.

Тому, коли початкове положення ротору є недоступним перед початком обертання, завжди слід використати певну процедуру запуску для досягнення безпечного початкового обертання. В літературі виділяють такі можливі процедури початку руху, як:

- початок руху за умов відомого стартового положення ротору (керування з оберненим зв'язком);
- керування за простим принципом "напруга-частота"; (керування без оберненого зв'язку);
- визначення положення ротору за певним алгоритмом.

Перший метод керування є найбільш зручним з точки зору забезпечення точності та швидкості визначення позиції магнітного поля в просторі. Це може бути досягнуто використанням зворотного зв'язку для виявлення позиції валу ротору для контролера керування поля. Проте надійність цього методу може бути недостатня за наявності навантаження на валу ротора. Синхронний двигун з двополюсним статором має рівну кількість обертів дроту на фазу. Потік магнітного поля ротора можна прийняти сконцентрованим по  $d$ -вісі, поки по вісі  $q$  потік буде нульовим. Такий стан також є у індукційних двигунів з непрямым векторним керуванням. Також приймається відсутність втрат. Також приймається постійність потоку поля ротора у визначеній точці простору. Змінність температури ротора впливає на магнітний потік, але в довготривалому інтервалі приймається як несуттєва. Немає необхідності використовувати рівняння напруги на роторі як для індукційного двигуна, оскільки джерело магнітного поля є магніти ротора, а отже й коливання потоку у довготривалому інтервалі є несуттєвими.

### Математична модель синхронного двигуна

В моделі синхронного двигуна використано рівняння статора індукційного двигуна та взаємодія з ротором через магнітний потік. Позиція магнітів ротору визначена конструкцією самого ротора, причому незалежно від напруг та струму статора. Визначеним є також миттєве значення наведеної ЕРС, а отже стають відомими струми статора та момент сили ротора. Проте тут аналогія з асинхронним двигуном завершується. Потоки магнітного поля ротора не є незалежними. Вони визначаються у взаємодії з напругами та струмами статора. Коли розглядаються опорні площі ротора, це означає, що еквівалент



Рис. 1. Інкрементний енкодер

площин  $q$  та  $d$  перетворюються на відповідні опорні площі, що призводять до обертання та визначають швидкість обертання ротору. В синхронному двигуні різниця між магнітним полем ротора та статора є нульовою. Саме тому двигун і отримав свою назву – синхронний. Відповідно площі  $q$  та  $d$  ротора та площі  $q$  та  $d$  статора мають фіксований фазовий зсув один до одного.

Рівняння, що пов'язують магнітні потоки:

$$v_{qs}^r = R_q i_{qs}^r + p \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r, \tag{2}$$

$$v_{ds}^r = R_d i_{ds}^r + p \lambda_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r, \tag{3}$$

де  $R_q$  та  $R_d$  – опори квадратурної площини (quadrature) та прямої (direct-axis) площини витків статора.

Тут та далі використовується опір  $R_s$ , а для  $q$  та  $d$  площин магнітний потік статора зв'язаний з потоком ротора рівняннями:

$$\lambda_{qs}^r = L_s i_{qs}^r + L_m i_{qs}^r \tag{4}$$

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{ds}^r \tag{5}$$

Проте самоіндукція статора в площинах  $q$  та  $d$  дорівнює  $L_s$  тільки коли магніти ротора мають електричний кут у  $180^\circ$ . Це має значення, коли вісі магніту та міжполярні вісі є різними. Коли положення обмоток статора (наприклад,  $d$  площина) у співрозміщенні з полем магніту ротора, сила відштовхування є максимальною: магнітне відштовхування магніту є майже таким, що і відштовхування через повітряний зазор. А тому індуктивність є найменшою в цей час. Тоді індуктивність приймається як індуктивність прямої площини  $L_d$ . В цей час площина  $q$  обмоток направлена на міжполярний шлях ротора, магнітний потік не визначається магнітами, оскільки знаходиться в точці мінімального рівня потоку. Тому відштовхування є мінімальним, а індуктивність максимальною. Індуктивність  $q$  площини відома як  $L_q$ .

Оскільки магніти ротора та площі направлення обмоток статора  $q$  та  $d$  визначено в просторі, так що індуктивність не міняється суттєво залежно від положення ротора. Тоді, для обрахунку потоку втрат статора у  $q$  та  $d$  площинах, струми ротора та статора потрібні. Збудження у постійних магнітах може бути промодельоване, прийнявши постійним струм джерела,  $i_{fr}$ . Потік ротора розміщено у  $d$  площині, тому струм ротора у  $d$  площині є  $i_{fr}$ . Струм в  $q$  площині приймається рівним нулю, прийнявши, що немає потоку в цій площині. Тоді потоки можуть бути описані як:

$$\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r, \tag{6}$$

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{fr}, \tag{7}$$

де  $L_m$  – взаємна індукція між обмотками статора та магнітами ротора.

Якщо підставити ці вирази у вирази напруги статора, це дає такі вирази як:

$$\begin{pmatrix} v_{qs}^r \\ v_{ds}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_q + L_q p & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_d + L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_r L_m i_{fr} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{8}$$

Електромагнітний момент визначається як:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r) \tag{9}$$

який, використавши підстановку потоків у термінах індуктивності та струму, буде наступним:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{af} i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r) \tag{10}$$

тут потік втрат ротору буде

$$\lambda_{af} = L_m i_{fr} \tag{11}$$

### Моделювання синхронного двигуна в середовищі Matlab

Для моделювання синхронного двигуна використано середовище Simulink в Matlab. На рис. 2 показана модель керування синхронним двигуном з оберненим зв'язком.

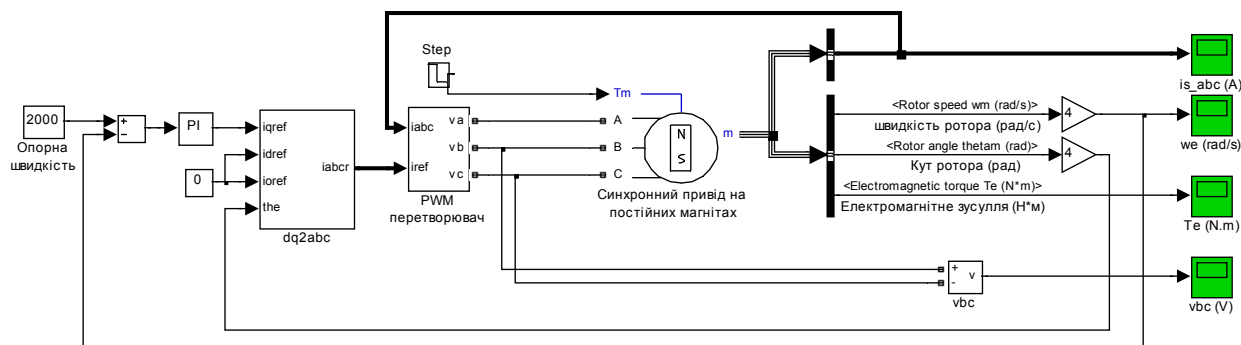


Рис. 2. Модель керування синхронним двигуном у середовищі Matlab Simulink

Задачею моделювання є дослідження зміни струмів та імпульсів керування для забезпечення задачі запуску двигуна, вихід його на робочу швидкість та утримування моменту на валу ротора.

Рис. 2 містить синхронний двигун на постійних магнітах, частота обертання якого визначається сигналами керування від PWM перетворювача. У свою чергу, PWM перетворювач генерує вихідний сигнал на основі інформації щодо струмів споживання двигуна, поточної швидкості двигуна та поточної позиції ротора. PI контролер визначає швидкість реакції системи на зміну обертання на основі часів інтегрування та диференціювання стану вхідного сигналу – поточної швидкості та відмінності її від опорної. Якщо час інтегрування є великим, тоді система повільно реагує на зміну швидкості. Це особливо важливо при динамічній зміні навантаження на валу двигуна. При короткому часі інтегрування навпаки досягається висока швидкість реакції на зміну сигналу. Диференціальна частина часу вимірювання визначає

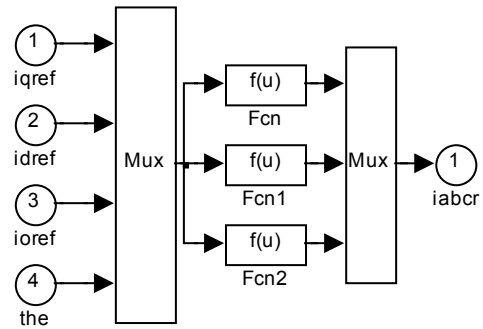


Рис. 3. Блок db2abc

швидкість зміни вихідного сигналу на основі різницевої інформації. Велике значення може призвести до флуктуацій та відповідного биття при обертанні, особливо на початку обертання ротора. На рис. 3 показано структурну схему блоку db2abc, що виконує перетворення стану 2-х

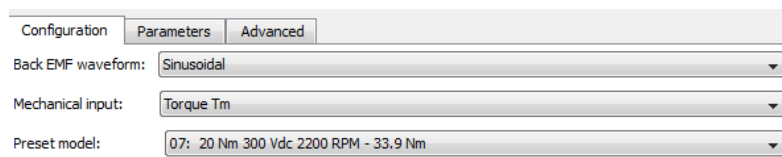


Рис. 4. Вибір передвстановленого типу двигуна

полюсного двигуна ( $q$  та  $b$  площини) у 3-фазний сигнал.

Наявна в середовищі Matlab Simulink модель двигуна має ряд попередньо встановлених типів двигунів. Так, для моделювання обрано двигун з тягою 20 Нм та максимальною швидкістю обертання 2200 об/хв. На рис. 5 показано параметри, що відповідають стану двигуна та визначають його енергетичні показники.

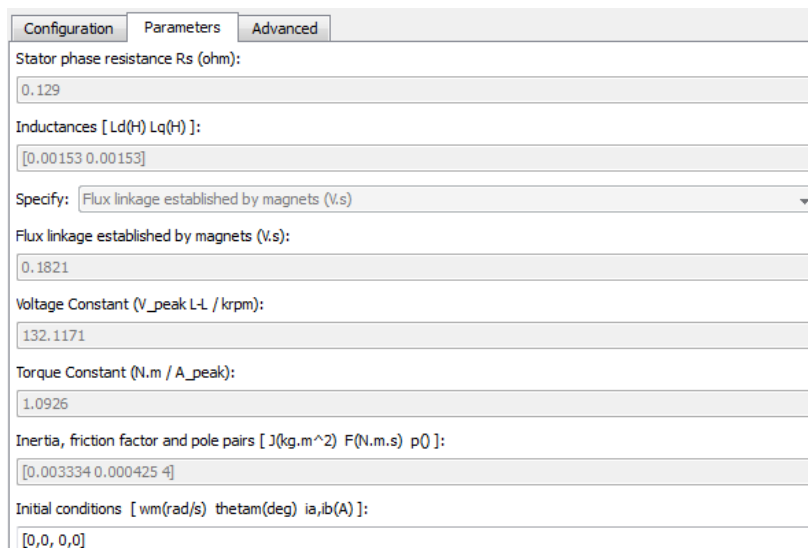


Рис. 5. Сторінка з електричними параметрами моделі двигуна

В моделюванні досліджено відгук системи на вплив зміни навантаження на ротор через 0.02 секунд часу моделювання. Відповідно, на рис. 6, рис. 7 та рис. 8 показано зміну струму живлення двигуна, швидкість зміни частоти обертання та механічної тяги.

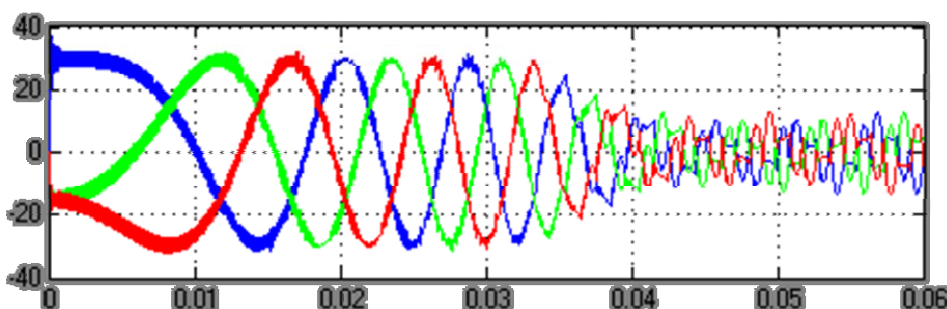


Рис. 6. Графік зміни струму живлення двигуна

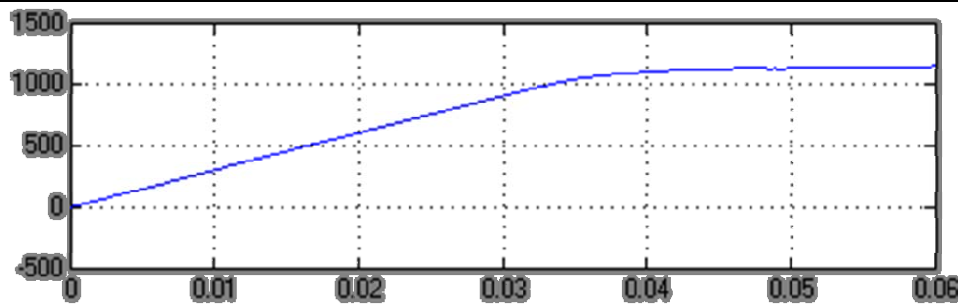


Рис. 7. Графік зміни швидкості обертання

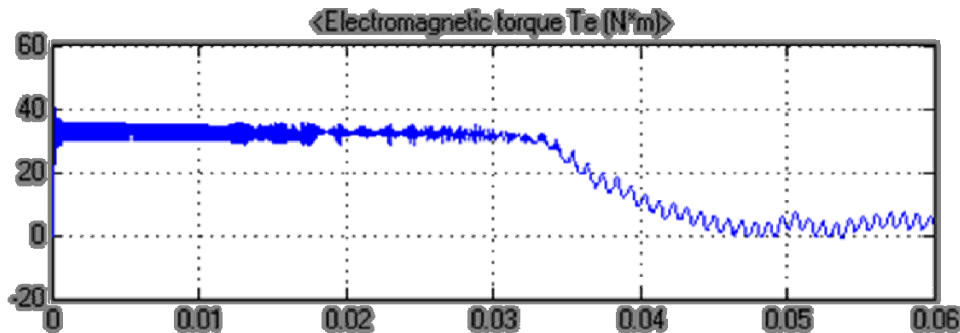


Рис. 8. Зміна механічної тяги на роторі двигуна

### Висновки

Отже, в результаті зміни навантаження на двигун, система керування забезпечує сталість швидкості наростання частоти обертання двигуна незалежно від зміни навантаження, а тому синхронний двигун забезпечує сталість механічних показників руху незалежно від зміни навантаження та обертання. При цьому напруга та струм керування двигуном динамічно змінюються для забезпечення вихідних показників.

### Література

1. EI Shahat, A, "Universal PM Synchronous Motor Drive System for Automotive Applications". Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio State University, USA, JES 2010 on-line: [journal.esrgroups.org/jes](http://journal.esrgroups.org/jes)
2. Kanakaraj, J.: Electrical Machines and Appliances Theory, A Publication under Government of Tamilnadu Distribution of Free Textbook Programme, Tamil Nadu Textbook Corporation, College Road, Chennai - 600 006. (2011).
3. Balazovic Peter; Sensorless PMSM Control for an H-axis Washing Machine Drive, Designer Reference Manual, Freescale Semiconductor, Inc. (2010) <http://www.freescale.com>
4. Daniel Fita; Field Weakening Control of PMSM, Master Thesis, School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Department of Electrical and Computer Engineering. (2005)
5. Горященко К.Л. Тенденції розвитку сучасної силової елементної бази для керування пристроями легкої промисловості / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – Ч.1. – С. 174-177
6. Krishnan; Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2001).

### References

1. EI Shahat, A, "Universal PM Synchronous Motor Drive System for Automotive Applications". Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio State University, USA, JES 2010 on-line: [journal.esrgroups.org/jes](http://journal.esrgroups.org/jes)
2. Kanakaraj, J.: Electrical Machines and Appliances Theory, A Publication under Government of Tamilnadu Distribution of Free Textbook Programme, Tamil Nadu Textbook Corporation, College Road, Chennai - 600 006. (2011).
3. Balazovic Peter; Sensorless PMSM Control for an H-axis Washing Machine Drive, Designer Reference Manual, Freescale Semiconductor, Inc. (2010) <http://www.freescale.com>
4. Daniel Fita; Field Weakening Control of PMSM, Master Thesis, School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Department of Electrical and Computer Engineering. (2005)
5. Horiashchenko K.L., Horiashchenko S.L. Tendencii rozvitku suchasnoi silovoy elementnoy bazi dlya keruvannya pristroyami legkoy promislivosti. Khmelnytskyi. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2004. Issue 5. Part 1. P. 174-177/
6. Krishnan; Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2001).

Рецензія/Peer review : 17.10.2018 р.

Надрукована/Printed :25.11.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

М.Н. КУХАРЧУК, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК  
Хмельницький національний університет

## ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ЗАКЛАДІВ ГРОМАДСЬКОГО ХАРЧУВАННЯ

*У роботі було проведено дослідження проблематики громадського харчування. Вперше розроблено технологію, яка дозволяє в ході формування споживацького меню у закладі громадського харчування врахувати персональні особливості клієнта в частині, що стосується стану його здоров'я.*

*Ключові слова: експертна система, заклад громадського харчування, дієта, стан здоров'я.*

M.N. KUKHARCHUK, O.A. PASICHNYK, T.K. SKRYPNYK  
Khmelnitskyi National University

### EXPERT SYSTEM OF PUBLIC CATERING

*Information surrounds us from all sides. In all institutions and institutions, a large amount of information is stored. Databases are used for its convenient use. However, we cannot restrict ourselves to just storing information; for its processing and application, software products are developed based on database management systems. Therefore, it is promising to develop this very part in the development of software products. Many people use public catering facilities. All of them have different flavors, they enjoy the dishes of one or another kitchen, and some ingredients cannot physically endure. In addition, according to the General Directorate of Statistics, in 2017, there were registered 2,477.5 thousand cases of the first registered diseases. Often, for some types of diseases, people are strictly forbidden to use certain products. For example, with diseases of the circulatory system (usually heart problems), physicians do not advise to eat fats, cholesterol, sugar. According to statistics, only in 2017, 113.9 thousand cases of cardiovascular diseases were registered. All these people should restrict themselves to the use of non-recommended products. An expert system is a computer system that can partially or completely replace a specialist expert in solving a problem situation. In computer science, expert systems are considered together with knowledge bases, as models of expert behavior in a particular area of knowledge, using procedures of logical conclusion and decision-making, and knowledge bases - as a set of facts and rules of logical conclusion in the chosen subject area. Expert systems of catering establishments can, based on expert data, choose the optimal set of dishes for clients, taking into account not only the taste preferences of the client but also the dietary instructions. The purpose of the work is to develop the information technology of selecting a consumer menu in public catering establishments, which allows taking into account personal characteristics of the client in the part relating to the health status. To achieve this goal, the following tasks were defined: to develop information technology for work with a base of diseases; to develop information technology for working with the base of dishes; develop a method for creating rules, a system of evaluation and an information system for working with an expert knowledge base; Perform algorithmic and programmatic implementation of the expert system to confirm its viability. At the stage of introducing expert knowledge into the EU, depending on the rules, a list of coefficients on which the EU will advise users is formed. At the stage of consulting / moderation, the software product is ready for use with users. The basis of the knowledge base is based on mathematical calculations, which are executed under the formula of full probability. The information technology of selection of a consumer menu of dishes in catering establishments is developed. Methods of creating expert rules are investigated. A system of estimation of the utility coefficient is algorithmically presented. The algorithmic and programmatic implementation of the expert system is executed. The application of technology makes it possible to formulate orders taking into account the health of the client. When forming the menu, not only taste preferences, but also dietary instructions are taken into account.*

*Keywords: expert system, institution of public nutrition, diet, state of health.*

### Вступ

Інформація оточує нас зі всіх сторін. Вона зберігається у великій кількості у всіх установах та закладах. Для зручного її застосування використовують бази даних. Але не можна обмежитись тільки зберіганням інформації, для її обробки та застосування розробляються програмні продукти на основі систем керування базами даних. Тому перспективним є розвиток саме цієї ланки у розробці програмних продуктів.

Для роботи з даними використовують відповідні програмні продукти. Такими продуктами є СКБД [1], які почали використовуватись після появи ПК. СКБД використовуються у всіх областях, починаючи від навчальних закладів, завершуючи державними установами. Однією з переваг сучасних СКБД є низькі вимоги до апаратної частини ПК. Крім того кожна нова версія СКБД розробляється з думкою про користувача. Інтерфейс стає більш інтуїтивним, а набір функцій розраховується таким чином, щоб пересічний користувач легко зміг зрозуміти суть.

Закладами громадського харчування користуються багато людей [2]. Усі вони мають різні смаки, полюбляють страви тієї чи іншої кухні, деякі інгредієнти можуть фізично не переносити. Крім того за даними Головного управління статистики у 2017 році було зареєстровано 2477,5 тисяч випадків уперше зареєстрованих захворювань. Часто при деяких видах захворювань людям категорично забороняється вживати ті чи інші продукти. Наприклад, при захворюваннях системи кровообігу (зазвичай проблеми з серцем), лікарі не радять вживати жири, холестерин, цукор. Згідно зі статистичними даними тільки у 2017 році зареєстровано 113,9 тисяч випадків серцево-судинних захворювань. Всі ці люди повинні обмежувати себе у вживанні не рекомендованих продуктів.

Робота закладів громадського харчування потребує використання великої кількості інформації і правильного її застосування. Інформація, яку зберігають БД закладів громадського харчування не закінчується на рецептурах. Зазвичай заклади високого рівня зберігають дані про вподобання клієнта, його смаки, хвороби тощо. Тому для автоматизації та оптимізації роботи закладів громадського харчування доцільним є застосування інформаційних технологій.

На даний момент для автоматизації та оптимізації роботи закладів громадського харчування існує



декілька програмних продуктів. Одними з рішень є програмні продукти «Общепит» від компанії 1С [3] та РестАрт: АРМ Повара від компанії 1С-Rarus [4]. Застосування такого типу автоматизують роботу одразу декількох відділів закладу громадського харчування. Вони дозволять швидко оформити замовлення, проконтролювати його видачу і швидко розрахувати клієнта. Недоліками таких програмних продуктів є відсутність можливості формування замовлення з урахуванням персональних особливостей клієнта в частині, що стосується здоров'я.

Виникає проблема, що заклади громадського харчування ігнорують потреби хворих людей у класифікації їх продукції відповідно до типів захворювань. Класифікацією об'єктів у вузькій предметній області займаються експертні системи.

Експертна система – комп'ютерна система, яка може частково або повністю замінити спеціаліста-експерта в рішенні проблемної ситуації [5]. В інформатиці експертні системи розглядаються разом з базами знань, як моделями поведінки експертів в окремій області знань з використанням процедур логічного виводу та прийняття рішень, а бази знань – як сукупність фактів і правил логічного висновку в обраній предметній області.

База знань складається з правил аналізу інформації від користувачі стосовно конкретної проблеми [6]. Експертна система аналізує ситуацію і залежно від направленої ЕС, дає рекомендацію стосовно рішення проблеми – рис. 1. Як правило, база знань містить факти (статистичні дані про предметну область) та правила – набір інструкцій, використовуючи які до конкретних фактів можна отримати нові факти.



Рис. 1. Стратегії отримання рішень

Зазвичай факти в базі знань описують ті явища, котрі є постійними для даної предметної області. Характеристики, значення котрих залежать від умов конкретної задачі, експертна система отримує від користувача в ході роботи і зберігає їх в робочій пам'яті.

Бази знань експертних систем створюються за допомогою трьох груп людей.

1. Експерти тієї проблемної області, до котрої відносяться задачі які вирішуються експертною системою.

2. Інженери по базах знань, які є спеціалістами з розробки інтелектуальних інформаційних систем.

3. Програмісти, які здійснюють реалізацію експертної системи.

Експертна система може функціонувати в двох режимах.

1. Режим вводу знань – в цьому режимі експерт за допомогою інженера по базах знань за допомогою редактора вводить відомі йому відомості про предметну область в базу знань експертної системи.

2. Режим консультації – користувач веде діалог з експертною системою, повідомляючи їй відомості про поточну проблему і отримує рекомендації від ЕС.

Експертні системи закладів громадського харчування можуть на основі даних експертів підібрати оптимальний набір страв для клієнтів зважаючи не тільки на смакові вподобання клієнта, але і на дієтологічні вказівки.

*Об'єкт дослідження.* Процес формування споживчого меню в закладах громадського харчування.

*Предмет дослідження.* Моделі, методи, підходи та засоби для побудови експертної системи закладів громадського харчування.

*Результати роботи.* Вперше розроблено технологію, яка дозволяє при формуванні споживацького меню у закладі громадського харчування врахувати персональні особливості клієнта в частині, що стосується стану його здоров'я.

*Практичне значення одержаних результатів.* Розроблено експертну систему підбору меню страв у закладах громадського харчування. В результаті було створено застосування експертної системи. Застосування технології дає можливість формувати замовлення з урахуванням стану здоров'я клієнта. При



формуванні меню враховуються не тільки смакові вподобання, а й дієтологічні вказівки.

#### Мета і постановка завдання

Мета роботи полягає у розробці інформаційної технології підбору споживацького меню у закладах громадського харчування, яка дозволяє врахувати персональні особливості клієнта в частині, що стосується стану здоров'я. Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- 1) розробити інформаційну технології для роботи з базою захворювань;
- 2) розробити інформаційну технологію для роботи з базою страв;
- 3) розробити метод створення правил, систему оцінювання та інформаційну систему для роботи з експертною базою знань;
- 4) виконати алгоритмічну та програмну реалізацію експертної системи для підтвердження її життєздатності.

#### Основна частина

Методи дослідження, застосовані для вирішення поставлених завдань: для реалізації інформаційної системи для роботи з базами страв та захворювань – методи формування оптимальної структури бази даних та параметричного пошуку; для формування бази знань – методи анкетування статистичної обробки даних; для реалізації експертної системи – методи багатокритеріальної оптимізації; для реалізації інформаційної технології – методи проектування інформаційних систем та об'єктно-орієнтований підхід.

Розроблюваний програмний продукт націлений на декілька груп користувачів – працівники кухні, експерти, користувачі. Робота з ними має проходити у декілька етапів, як показано на рис. 2. На кожному етапі описується стадія, починаючи від занесення довідкової інформації – до режиму підбору.

На етапі внесення в ЕС знань експертів залежно від правил формується список коефіцієнтів за яким ЕС буде консультувати користувачів. Рядок коефіцієнтів буде мати наступний вигляд – «Стіл, 0.01, 1,0.9,0.01, 2,0,0.01, 4,1,0.001, 7,0.9,0.03». Перший елемент – це елемент, до якого застосовується ЕС. Після коми вказується апріорна ймовірність даного результату. Вона показує, що в разі відсутності додаткової інформації – результат події дорівнюватиме 1%. Далі через кому йде ряд повторюваних груп з трьох елементів. Перший елемент кожної групи – це номер відповідного запитання (симптому, свідoctва, ознаки). Наступний елемент – це ймовірність відповіді «так» на питання 1, якщо можливий результат вірний (P<sub>y</sub> – це P «yes»). Третій елемент показує ймовірність того, що можливий результат невірний. Згідно з прикладом, для першого запитання існує 1% ймовірності того, що якщо ми отримаємо відповідь «так» на перше запитання, результат буде не вірний.

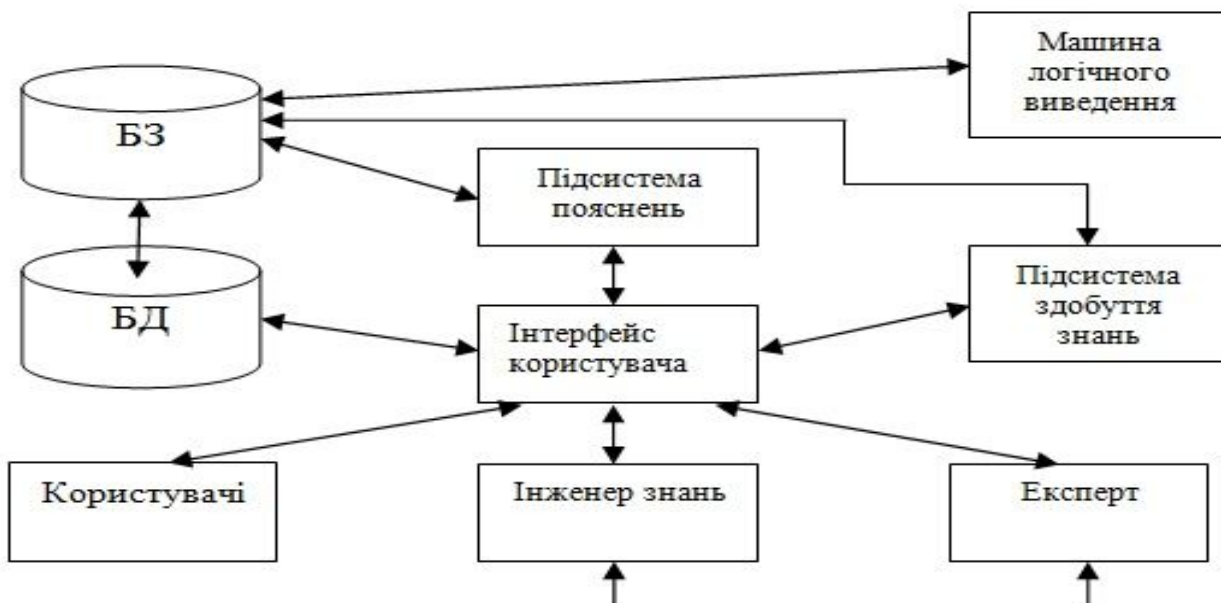


Рис. 2. Принцип роботи застосунку

На етапі режиму консультації/модерації програмний продукт готовий до роботи з користувачами. Принцип роботи бази знань заснований на математичних розрахунках, які виконуються за формулою повної ймовірності [7]:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i)P(A | B_i)}{\sum P(B_i)P(A | B_i)} \quad (1)$$

Формула повної ймовірності дозволяє переоцінити ймовірність гіпотез після того, як стає відомим результат випробувань, в підсумку якого з'явилась подія.

Значення  $P(A|B)$  та  $P(A|\text{не}B)$  підставлені в теорему Байєса дозволяють підрахувати апостеріорну ймовірність результату, тобто ймовірність скореговану залежно від відповіді користувача на дане запитання:

$$P_{\text{апостеріорна}} = \frac{P_y P}{P_y P + P_n (1 - P)} \quad (2)$$

Значення  $P(B|A)$  знаходиться для кожної дієти кожного правила окремо. На виході формується меню страв з коефіцієнтом корисності (від 0 до 1, де 0 – не рекомендується до вживання, 1 – рекомендується до вживання). Страви групуються у список від найбільш корисного до найменш корисного.

### Висновки

Розроблено інформаційну технологію підбору споживацького меню страв у закладах громадського харчування. Досліджено методи створення експертних правил. Алгоритмічно подано систему оцінювання коефіцієнта корисності. Виконано алгоритмічну та програмну реалізацію експертної системи. Застосування технології дає можливість формувати замовлення з урахуванням стану здоров'я клієнта. Під час формування меню враховуються не тільки гастрономічні вподобання, а й дієтологічні вказівки.

### Література

1. Elmasri R. Fundamentals of database systems / R. Elmasri, B. Shamkant, T. Navath. – Boston, MA, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 2006. – 543 p.
2. Громадське харчування: організація роботи, документальне оформлення, облік [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://cons.parus.ua/\\_d.asp?r=03A6Gc88598db68215566c20df2054bb16e0f](http://cons.parus.ua/_d.asp?r=03A6Gc88598db68215566c20df2054bb16e0f)
3. IS Управление рестораном и IS для кафе [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://iobshepit.com/obzor/>
4. РестАрт 3: Кухня [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://rarus.ru/1c-restoran/restart-red-3-kukhnya/>
5. Giarratano C. Expert Systems: Principles and Programming / C. Giarratano, G.Riley. – Dallas, TX, Books Worldwide Express, 1998. – 270 p.
6. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – Санкт-Петербург : «ПИТЕР», 2000. – 375 с.
7. Capinski D. Measure, Integral and Probability / D. Capinski, M. Marek, P. Kopp. – New York, NY : Springer Verlag, 2004. – 170 p.

### References

1. Elmasri R. Fundamentals of database systems / R. Elmasri, B. Shamkant, T. Navath. – Boston, MA, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 2006. – 543 p.
2. Hromadske kharchuvannia: orhanizatsiia roboty, dokumentalne oformlennia, oblik [Electronic resource]. – Access mode: [http://cons.parus.ua/\\_d.asp?r=03A6Gc88598db68215566c20df2054bb16e0f/](http://cons.parus.ua/_d.asp?r=03A6Gc88598db68215566c20df2054bb16e0f/). [in Ukrainian]
3. IS Upravlenye restoranom y IS dlia kafe [Electronic resource]. – Access mode: <http://iobshepit.com/obzor/>. [in Russian]
4. RestArt 3: Kuhnna [Electronic resource]. – Access mode: <https://rarus.ru/1c-restoran/restart-red-3-kukhnya/>. [in Russian]
5. Giarratano C. Expert Systems: Principles and Programming / C. Giarratano, G.Riley. – Dallas, TX, Books Worldwide Express, 1998. – 270 p.
6. Gavrilova T.A., Bazy znanyi yntellektualnykh system / T.A. Gavrilova, V.F. Horoshevskiy. – Saint Petersburg, «PI TER», 2000. – 375 p. [in Russian]
7. Capinski D. Measure, Integral and Probability / D. Capinski, M. Marek, P. Kopp. – New York, NY, Springer Verlag, 2004. – 170 p.

Рецензія/Peer review : 17.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сорокати́й Р.В.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІЯЛЬНОСТІ РЕЛІГІЙНОЇ УСТАНОВИ

В статті визначено можливість уніфікації програмного забезпечення для автоматизації внутрішньої діяльності відповідних релігійних установ. Викладено узагальнену математичну модель локалізації системи автоматизації діяльності релігійної установи. Розглянуто інформаційну технологію автоматизації діяльності релігійної установи, до яких належать можливість, простота та остаточність локалізації. Можливість локалізації визначає можливість модифікації програмної системи під вимоги конкретної релігійної установи незалежно від конфесії та використовуваної мови. Простота локалізації полягає в можливості проведення всіх кроків локалізації кінцевим користувачем перед початком роботи з системою. Остаточність локалізації визначає, що виконані в процесі локалізації модифікації використовуються в подальшому для виконання функцій системи й не можуть бути перевизначені. Локалізація програмного забезпечення є його підготовкою до використання в конкретних умовах. Локалізація часто використовується для поширення програмного забезпечення загального призначення в нових географічних чи культурних умовах. Вона включає операції з визначення ряду параметрів інформаційної системи. Відповідно до такого підходу, повний цикл переведення системи до експлуатації розбивається на ряд етапів, частина яких може бути виконана для загальних категорій релігійних установ. Зменшення кількості можливих варіантів локалізації на кожному етапі дозволяє реалізувати їх на рівні, який доступний для використання кінцевим користувачем. Тому кінцевий користувач одержує можливість самостійного впровадження системи для подальшого використання. Запропонована інформаційна технологія автоматизації діяльності релігійної установи дозволяє розробляти кросконфесійні інформаційні системи автоматизації діяльності релігійної установи, які можуть бути легко модифіковані для автоматизації внутрішньої діяльності конкретних релігійних установ різних конфесій та на різних мовах інтерфейсу.

Ключові слова: релігійні установи, автоматизація, локалізація, інформаційна технологія.

K. ROYZNER, O. MAZURETS  
Khmelnitsky National University

### INFORMATION TECHNOLOGY OF THE AUTOMATION OF THE RELIGIOUS INSTITUTION ACTIVITY

The article considers the possibility of unifying the software for automating the internal activities of the respective religious institutions. A generalized mathematical model of the localization of the automation system for the activity of a religious institution is presented. The information technology of automation of the activity of a religious institution is considered. The peculiarities of the considered information technology of the automation of the activity of the religious institution, which include the possibility, simplicity and ultimate localization, are determined. The possibility of localization determines the possibility of modifying the program system to the requirements of a particular religious institution, regardless of the denomination and the language used. The simplicity of localization is the ability to complete all localization steps by user before starting to work with the system. The ultimate localization determines that the modifications made during the localization process are used in the future to perform system functions and can not be redefined. Localization of the software is its preparation for use in specific conditions. Localization is often used to distribute general-purpose software under new geographic or cultural conditions. It includes operations to determine a number of information system parameters. According to this approach, the complete cycle of system transfer to operation is divided into several stages, some of which can be performed for general categories of religious institutions. Reducing the number of possible localization options at each stage allows them to be implemented at the level that is available for use by user. Therefore, user gets the opportunity to independently implement the system for future use. The proposed information technology of the automation of the activity of a religious institution allows the development of the crossdenominational information systems for the automation of the activities of the religious institution, which can be easily modified to automate the internal activities of specific religious institutions of different denominations and in various languages of the interface.

Keywords: religious institutions, automation, localization, information technology.

### Постановка проблеми в загальному вигляді

Сучасні інформаційні технології забезпечують користувачам високий рівень комунікації і формують нові, мережеві спільноти. Відкриті інформаційні системи дозволяють дізнаватися про активність конкретних громад і їх лідерів, вивчати інші релігії, відвідуючи релігійні служби в онлайн-просторі. Функціональні можливості сучасних інформаційних систем у релігії дозволили сформувати багато мережевих проєктів, в тому числі мережеві богослужіння, сайти сповіді та причастя, віртуальні релігійні бібліотеки тощо. Релігія знаходить своє втілення в інформаційному просторі, віртуальний сегмент все більш помітно впливає на соціально-релігійну дійсність, що сприяє активізації релігійного життя, появи релігійного інформаційного простору, інтернет-церков, поширення віртуального місіонерства, релігійний відеохостінг тощо.

На сучасному етапі Інтернет відображає різноманітні риси й суперечності сучасного суспільства. Так, з одного боку Інтернет сприяє глобалізації, а з іншого – служить збереженню культурної ідентичності, соціальної автономії, в тому числі і в релігії. Завдяки мережі Інтернет відбувається відповідна модернізація релігії. З розвитком інформаційних технологій, за допомогою нових способів комунікації, які пропонує Інтернет, розширюються можливості зворотного зв'язку і особистого вибору віруючих, відбувається

видозміна релігійних практик і самого інституту релігії, яка стає більш відкритою і більш доступною. Практично всі конфесійні об'єднання організують свої відкриті інформаційні ресурси, де можна не тільки отримати інформацію про організацію, а й взяти участь у якомусь обряді [1].

#### Аналіз останніх досліджень

Актуальним питанням ролі інформаційних технологій в діяльності релігійних організацій, використанню мережі Інтернет для забезпечення відкритого доступу до інформації, різноманітним аспектам автоматизації діяльності релігійних установ засобами інформаційних технологій присвячені праці авторів як гуманітарної направленості, так і в галузі точних наук: Забияко А. П., Божук Т. І., Пронько А. М., Карафлуджкі А. [2], Зеленської Л. І., Котлярчук Д. Є. [3], Ковальчук А. С. [4] та інших. Більшість проведених досліджень стосуються соціальних та філософських аспектів взаємодії сучасних інформаційних технологій та окремих аспектів діяльності релігійних установ, в той час як питання прикладних застосувань інформаційних систем для автоматизації діяльності релігійних установ розкриті недостатньо. Це пояснюється в першу чергу численністю релігійних установ різних конфесій, рівнів та географії, в умовах їх спеціалізації на задачах, що традиційно не вимагали вжитку інформаційних технологій.

Релігійні установи використовують інформаційні системи для забезпечення різноманітних комунікаційних та організаційних потреб, яке загалом можна розділити на наступні групи:

- Програмне забезпечення для зовнішнього використання – характеризується наданням широкого відкритого доступу до викладених матеріалів. До цієї категорії належать віртуальні періодичні видання релігійних установ, інформаційні сайти, бібліотеки та сервіси для спілкування.

- Програмне забезпечення для внутрішнього використання – характеризується накопиченням даних для внутрішнього використання для організаційних, аналітичних цілей та ведення звітності. До цієї категорії належать системи, що автоматизують виконання визначеного обсягу функцій відповідних працівників релігійних установ; зазвичай це прості програмні продукти або офісне програмне забезпечення широкого вжитку.

- Програмне забезпечення для зовнішньої емуляції внутрішнього використання – характеризується збором даних для внутрішнього використання для організаційних, аналітичних цілей та ведення звітності, яке здійснюється шляхом їх внесення до системи зовнішніми користувачами. До цієї категорії належать системи, що дозволяють прихожанам шляхом використання відкритого зовнішнього доступу вносити свої індивідуальні дані до системи, записуватись на заходи та церемонії, залишати відгуки тощо. Хоча з точки зору даних таке програмне забезпечення можна віднести до категорії програмного забезпечення для внутрішнього використання, з точки зору технологій доступу дане програмне забезпечення можна віднести до категорії програмного забезпечення для зовнішнього використання.

На сьогодні існує багато різноманітних зразків програмного забезпечення для зовнішнього використання, причому рівень їх реалізації зазвичай доволі високий у порівнянні з аналогічними програмними продуктами в інших областях. Водночас рівень інформаційних систем для автоматизації діяльності релігійних установ визначається доволі низьким. Програмне забезпечення для зовнішньої емуляції внутрішнього використання можна розглядати як похідний клас від програмного забезпечення для внутрішнього використання, оскільки такі зразки передбачають наявність аналогічної бази даних та подальше використання інформації працівниками діяльності релігійних установ локально.

Аналіз інформаційних моделей діяльності релігійних установ різних конфесій та рівня виявив, що значна частина їх елементів має спільні риси, а функціональна модель є подібною. Це визначає можливість уніфікації програмного забезпечення для автоматизації внутрішньої діяльності відповідних релігійних установ.

#### Постановка задачі

Метою роботи є розробка інформаційної технології автоматизації діяльності релігійної установи. Особливістю інформаційної технології визначається можливість реалізації програмної системи з можливістю локалізації – налаштування під датові вимоги конкретної релігійної установи незалежно від конфесії та використовуваної мови.

#### Викладення основних матеріалів дослідження

На даному етапі додатки для автоматизації внутрішньої релігійних установ розробляються переважно як цільові програмні продукти, орієнтовані під потреби певної релігійної установи. За такого підходу після етапу розробки (включаючи тестування) слідує етапи налаштування (включаючи впровадження й заповнення БД) та використання (рис. 1).

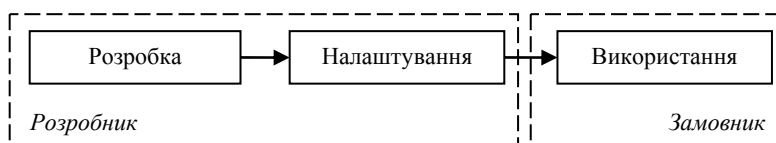


Рис. 1. Стандартна послідовність етапів впровадження системи автоматизації діяльності релігійної установи

Характерні риси інформаційних моделей діяльності релігійних установ різних конфесій та рівнів визначають, що значна частина їх елементів має спільні риси, а функціональна модель є подібною. Тому є доцільною уніфікація програмного забезпечення для автоматизації внутрішньої діяльності таких установ.

Процес приведення універсальної моделі до цільового вигляду визначається як процес локалізації.

Локалізація програмного забезпечення є його підготовкою до використання в конкретних визначених умовах. Локалізація часто використовується для поширення програмного забезпечення загальної призначення в нових географічних чи культурних умовах і включає визначені операції з перевизначення ряду параметрів інформаційної системи (наприклад, мови, кольорової палітри, ілюстративного матеріалу тощо).

Відповідно до такого підходу, повний цикл переведення системи до експлуатації, характерний для стандартної послідовності, розбивається на ряд етапів, переважна частина яких може бути виконана для цілих категорій релігійних установ. Суттєве зменшення кількості можливих варіантів локалізації на кожному з етапів дозволяє реалізувати їх на рівні, доступному для використання кінцевим користувачем (рис. 2). Відповідно, кінцевий користувач одержує можливість самостійного впровадження системи для цільового використання.

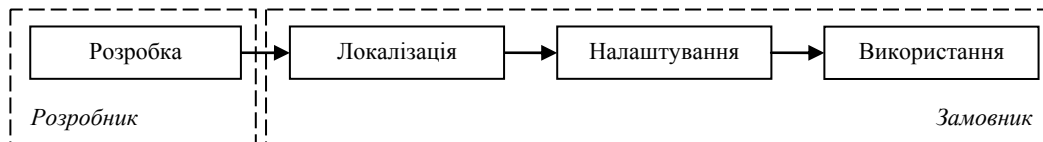


Рис. 2. Послідовність етапів впровадження системи автоматизації діяльності релігійної установи з локалізацією

Для визначення даних, що потребують використання у процесі локалізації інформаційної системи, вся множина необхідних модифікацій  $L_{All}$  може бути подана у наступному вигляді:

$$(L_{Den} \cup L_{Lang} \cup L_{Org}) \subset L_{All} \text{ ,} \tag{1}$$

де  $L_{Den}$  – множина налаштувань по конфесії,  $L_{Lang}$  – множина налаштувань по мові,  $L_{Org}$  – множина налаштувань по обраній установі.

Причому, відповідно до (1), кожен елемент множини є елементом підмножини  $L_{Den}$ ,  $L_{Lang}$  або  $L_{Org}$ :

$$L_{All} = \{x | x \in L_{Den} \vee x \in L_{Lang} \vee x \in L_{Org}\} \tag{2}$$

В (2) до множини налаштувань по конфесії  $L_{Den}$  входять налаштування, що визначають спільну для конфесії групу параметрів, які стосуються використання інформаційної системи для визначеної конфесії:

$$L_{Den} = \{x | x \in L_{DenPic} \vee x \in L_{DenColor} \vee x \in L_{DenFont} \vee x \in L_{DenLabel} \vee x \in L_{DenText}\} \text{ ,} \tag{3}$$

де  $L_{DenPic}$  – множина графічних зображень згідно обраної конфесії,  $L_{DenColor}$  – множина кольорів до оформлення інтерфейсу згідно обраної конфесії,  $L_{DenFont}$  – множина типів шрифтів інтерфейсу згідно обраної конфесії,  $L_{DenLabel}$  – множина текстових елементів інтерфейсу згідно обраної конфесії,  $L_{DenText}$  – множина текстових записів у БД згідно обраної конфесії.

До множини налаштувань по мові  $L_{Lang}$  входять всі елементи, які визначаються вибором мови інтерфейсу системи:

$$L_{Lang} = \{x | x \in L_{LangPic} \vee x \in L_{LangLabel} \vee x \in L_{LangText}\} \text{ ,} \tag{4}$$

де  $L_{LangPic}$  – множина мовозалежних графічних зображень згідно обраної конфесії,  $L_{LangLabel}$  – множина текстових елементів інтерфейсу на обраній мові згідно обраної конфесії,  $L_{LangText}$  – множина текстових записів у БД на обраній мові згідно обраної конфесії.

До множини налаштувань по обраній установі  $L_{Org}$  належать безпосередньо дані цільової релігійної установи, що вносяться вручну безпосередньо кінцевими користувачами на перших етапах використання системи, наприклад дані працівників, реквізити установи, плани роботи тощо.

Оскільки метою застосування інформаційної технології є формування елементів інтерфейсу і початкових даних БД, то модифікація системи та її БД визначається як мета застосування підсистеми локалізації (рис. 3). При цьому БД локалізації містить всі елементи всіх розроблених варіантів локалізації. Як результат роботи підсистеми локалізації, проводиться відповідна модифікація елементів підсистеми користувацького інтерфейсу та пере визначення визначених записів в користувацькій базі даних.

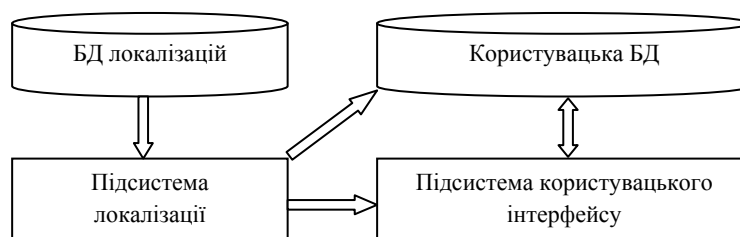


Рис. 3. Потіки даних при локалізації системи автоматизації діяльності релігійної установи

Відповідно, інформаційна технологія автоматизації діяльності релігійної установи передбачає проведення локалізації як результат ряду послідовних етапів (рис. 4). Найбільш загальним є вибір актуальної

конфесії (Блок 1), що визначає область подальших дій. Залежно від вибору актуальної конфесії, проводиться обробка елементів множини налаштувань по конфесії (Блок 2), внаслідок чого визначаються елементи, які будуть використані для модифікації. Вибір мови інтерфейсу системи (Блок 3) остаточно формує вибірку елементів, що будуть використані при локалізації за критерієм вибору мови (Блок 4). Внесення елементів множини налаштувань по обраній установі (Блок 5) полягає у занесенні вручну до бази даних початкових даних цільової релігійної установи кінцевими користувачами. В результаті формується користувацька база даних, яка й використовується при роботі кінцевих користувачів з відповідною інформаційною системою автоматизації діяльності релігійної установи (рис. 5).

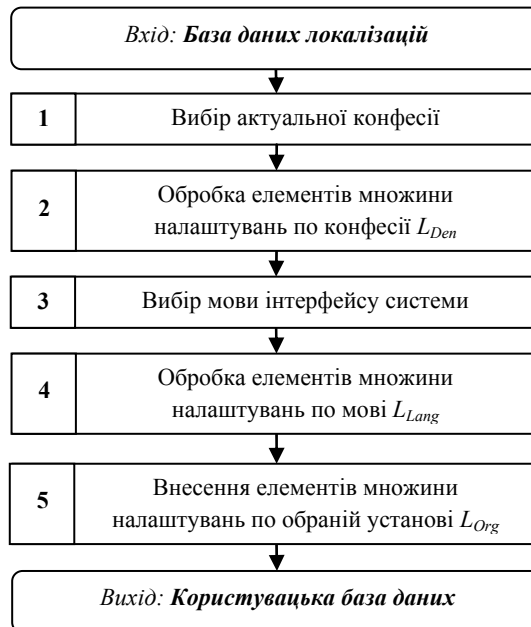


Рис. 4. Схема інформаційної технології автоматизації діяльності релігійної установи

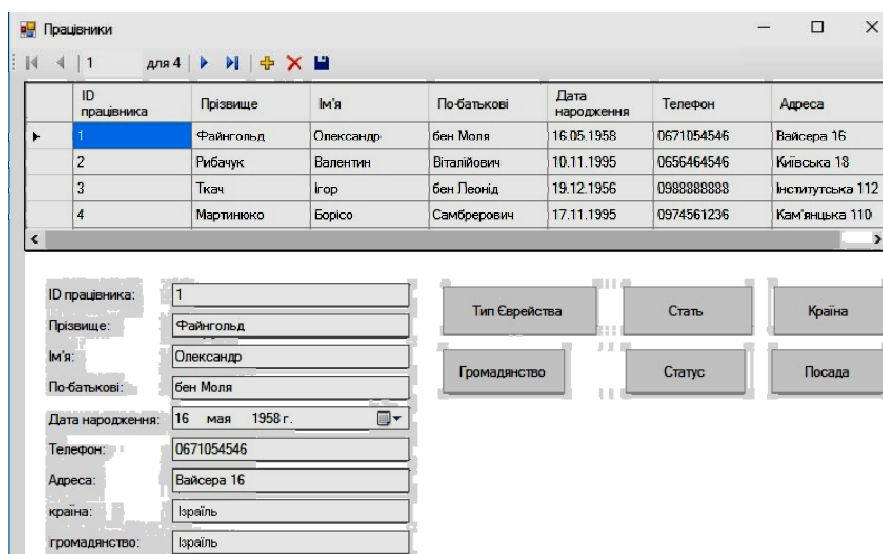


Рис. 5. Робота з даними в локалізованій системі автоматизації діяльності релігійної установи

Особливостями розглянутої інформаційної технології автоматизації діяльності релігійної установи є:

- можливість локалізації – модифікації програмної системи з можливістю налаштування під даталогічні вимоги конкретної релігійної установи незалежно від конфесії та використовуваної мови;
- простота локалізації – можливість проведення всіх локалізацій кінцевим користувачем перед початком роботи з системою;
- остаточність локалізації – виконані в процесі локалізації модифікації використовуються в подальшому для виконання функцій системи й не можуть бути перевизначені.

#### Висновки

В статті визначено можливість уніфікації програмного забезпечення для автоматизації внутрішньої діяльності відповідних релігійних установ. Викладено узагальнену математичну модель локалізації системи автоматизації діяльності релігійної установи. Розглянуто інформаційну технологію автоматизації діяльності

релігійної установи. Визначено особливості розглянутої інформаційної технології автоматизації діяльності релігійної установи, до яких належать можливість, простота та остаточність локалізації. Можливість локалізації визначає можливість модифікації програмної системи під вимоги конкретної релігійної установи незалежно від конфесії та використовуваної мови. Простота локалізації полягає в можливості проведення всіх кроків локалізації кінцевим користувачем перед початком роботи з системою. Остаточність локалізації визначає, що виконані в процесі локалізації модифікації використовуються в подальшому для виконання функцій системи й не можуть бути перевизначені.

Отже, запропонована інформаційна технологія автоматизації діяльності релігійної установи дозволяє розробляти кросконфесійні інформаційні системи автоматизації діяльності релігійної установи, які можуть бути легко модифіковані для автоматизації внутрішньої діяльності конкретних релігійних установ різних конфесій та на різних мовах інтерфейсу.

### Література

1. Пронько А. М. Релігія в епоху інформаційних технологій / А. М. Пронько // Сучасні тенденції розвитку науки. – Харків, 2017. – С. 161–163.
2. Karaflogka A. Religious Discourse and Cyberspace / A. Karaflogka // Religion. – 2002. – № 32. – P. 279–291.
3. Зеленська Л. І. Картографічне забезпечення релігійного туризму (регіональний компонент) / Л. І. Зеленська, Д. Є. Котлярчук // Національне картографування: стан, проблеми та перспективи розвитку : збірник наук. праць. – К., 2005. – Вип. 2. – С. 158–166.
4. Ковальчук А. С. Релігійний туризм в Україні: проблеми і перспективи розвитку / А. С. Ковальчук // Україна та глобальні процеси: географічний вимір : збірник наук. праць : у 3 т. – К.; Луцьк : Вежа, 2000. – Т. 1. – С. 365–367.

### References

1. Pronko A. M. Relihiia v epokhu informatsiinykh tekhnolohii / A. M. Pronko // Suchasni tendentsii rozvytku nauky. – Kharkiv, 2017. – S. 161–163.
2. Karaflogka A. Religious Discourse and Cyberspace / A. Karaflogka // Religion. – 2002. – № 32. – P. 279–291.
3. Zelenska L. I. Kartohrafichne zabezpechennia relihiinoho turyzmu (rehionalnyi komponent) / L. I. Zelenska, D. Ye. Kotliarchuk // Natsionalne kartohrafuvannia: stan, problemy ta perspektyvy rozvytku : zbirnyk nauk. prats. – K., 2005. – Vyp. 2. – S. 158–166.
4. Kovalchuk A. S. Relihiinyi turyzm v Ukraini: problemy i perspektyvy rozvytku / A. S. Kovalchuk // Ukraina ta hlobalni protsesy: heohrafichnyi vymir : zbirnyk nauk. prats : u 3 t. – K.; Lutsk : Vezha, 2000. – T. 1. – S. 365–367.

Рецензія/Peer review : 29.10.2018 р.

Надрукована/Printed :20.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатиї Р.В.



О.П. НИЧ, В.І. СТЕЦЬОК, К.Л. ГОРЯЩЕНКО

Хмельницький національний університет

ПІТЕР ШІДЕР

Метропласт асансор ЛТД, Стамбул, Турція

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

Синхронний двигун дозволяє отримати відмінні тягові показники, одночасно забезпечуючи чітке керування швидкістю обертання. Синхронний двигун дозволяє забезпечити стабільність обертання при зміні рівня навантаження на валу. Проте зміна рівня навантаження вимагає швидкісної системи реагування та формування керуючих сигналів, щоб не допустити зриву синхронізації. Відомі системи керування використовують датчики положення ротору двигуна. Створення бездатчикової системи керування потребує застосування нових підходів у проектуванні таких систем.

Ключові слова: синхронний двигун, сенсор, векторне керування.

O.P. NICH, V.I. STETIUK, K.L. HORIASCHENKO

Khmelnyskiy National University

PETER SCHIDER

Metroplast Asansor LTD, Istanbul, Turkey

## DEVELOPING OF SYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM

Synchronous motor allows receiving high mechanical values at the same time archives high precision controlling of rotation speed. Such type of motor gives to end-user stability of rotations with variable load on rotor. Rapid controlling requires fast response of control software with vector control in it. If rotor load level is higher of allowed synchronisation will be lost and motor is emergency stopped.

Several types of controlling of synchronous motors rotor position known and suitable for everyday use. Simple control schema utilizes PWM power controlling for UVW phases. This schema gives 8 vectors in voltage space very similar to scalar control. Modern control software and hardware utilize encoders to determine rotor position together with PWM power controlling. Vector control of phase voltages with encoder gives fast response at start and stable zero-speed hold. Main disadvantage is high-cost sensor. Usually for synchronous motors require digital encoder with SinCos or EnDat interfaces. After developing of IPMSM it allows to create sensorless controlling hardware. But this requires complex solution.

Keywords: PMSM, IPMSM, sensor, vector control.

Синхронні машини з постійними магнітами (СМПМ) відрізняються тим, що замість обмотки збудження на роторі у них розташовані постійні магніти, що створюють збуджуючий магнітний потік. Статор цих машин подібний до статора асинхронного двигуна і має дво- або трифазну обмотку. При складанні математичної моделі СМПМ, прийємо наступні припущення [1]:

- 1) відсутні насичення магнітного кола, втрати в сталі, ефект витіснення струму;
- 2) обмотки статора симетричні;
- 3) індуктивність розсіяння не залежить від положення ротора в просторі.

Розглянемо рівняння рівноваги напруги статора СМПМ, скориставшись моделлю двигуна, представленою на рис. 1.

Рівняння СМПМ розглядатимемо в ортогональній синхронній системі координат  $(d, q)$ , вісь  $d$  якої орієнтована по магнітній осі ротора і обертається разом з нею. Швидкість ортогональної системи в електричному просторі дорівнює синхронній швидкості  $p_n \omega = \omega_{0en}$ , де  $p_n$  – число пар полюсів,  $\omega$  – швидкість обертання валу двигуна. Трифазна обмотка статора замінена двома обмотками, осі яких направлені по осях координат  $(d, q)$ . Обмотки нерухомі відносно обертальної системи координат  $(d, q)$  і характеризуються активним опором  $R_s$  та індуктивностями  $L_{sd}$  і  $L_{sq}$ . На обмотки подаються напруги  $U_{sd}$  і  $U_{sq}$ , внаслідок чого по них протікають струми  $I_{sd}$  і  $I_{sq}$ . При прийнятому напрямі осей координат потокозчеплення статора по осі  $d$   $\Psi_{sd}$  визначається струмом  $I_{sd}$  і магнітним потоком, що створюється постійними магнітами, а по осі  $q$   $\Psi_{sq}$  – тільки струмом  $I_{sq}$ . Потокозчеплення може бути представлено просторовим вектором, нерухомим відносно ротора і обертальним разом із ним, а значить і з системою координат  $(d, q)$ . Таким чином, рівняння для проекцій узагальненого вектору напруги статора і вектору потокозчеплення на осі системи координат, що обертається, в операторній формі виглядають таким чином:

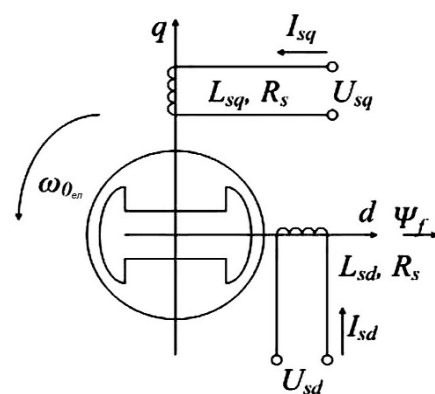


Рис. 1. Модель СМПМ в обертальній системі координат

$$\begin{aligned}
 U_{sd} &= R_s I_{sd} + p\psi_{sd} - w_{0el}\psi_{sq}; \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + p\psi_{sq} + w_{0el}\psi_{sd}; \\
 \psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\
 \psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $R_s$  – опори фази обмотки статора;  $L_{sd}, L_{sq}$  – індуктивності обмоток статора по осях  $d$  і  $q$ ;  $I_{sd}, I_{sq}, U_{sd}, U_{sq}$  – струми і напруга статора по осях  $d$  і  $q$ ;  $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_f$  – потокозчеплення статора по осях  $d$  і  $q$  створюване постійним магнітом. Рівняння для електромагнітного моменту і рівняння механіки:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}); \\
 pw &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta_w),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де  $J$  – момент інерції ротора;  $M, M_c$  – електромагнітний момент і момент опору;  $\beta$  – коефіцієнт в'язкого тертя (коефіцієнт демпфування).

Заздалегідь підставивши вирази для потокозчеплення в рівняння для проекцій вектору напруги, перепишемо рівняння (1) і (2) відносно струмів  $I_d$  і  $I_q$ :

$$\begin{aligned}
 pI_{sd} &= \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} - R_s I_{sd} + w_{0el} L_{sq} I_{sq}); \\
 pI_{sq} &= \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - R_s I_{sq} - w_{0el} L_{sd} I_{sd} - w_{0el} \psi_f); \\
 M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}); \\
 pw &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta_w).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

На основі математичної моделі СМПМ, вираженої системою рівнянь (3) отримаємо класичну схему СМПМ в обертовій системі координат (рис. 2).

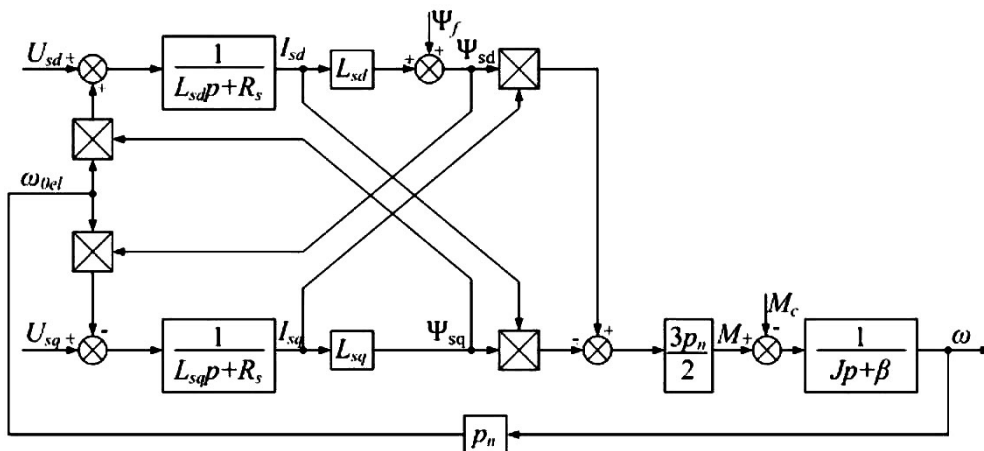


Рис. 2. Структурна схема СМПМ в обертовій системі координат

Як відомо, при зміні навантаження швидкість синхронного двигуна залишається постійною але змінюється кутове положення просторового вектору потокозчеплення ротора відносно вектору потокозчеплення статора. У режимі ідеального холостого ходу вказані вектори збігаються в просторі, але під час подачі навантаження на вал двигуна вектор потокозчеплення ротора починає відставати від вектору потокозчеплення статора на деякий кут званий кутом навантаження. Кут навантаження, який вимірюється в радіанах, визначається через інтеграл від різниці миттєвих значень швидкостей поля статора і ротора в електричному просторі, що

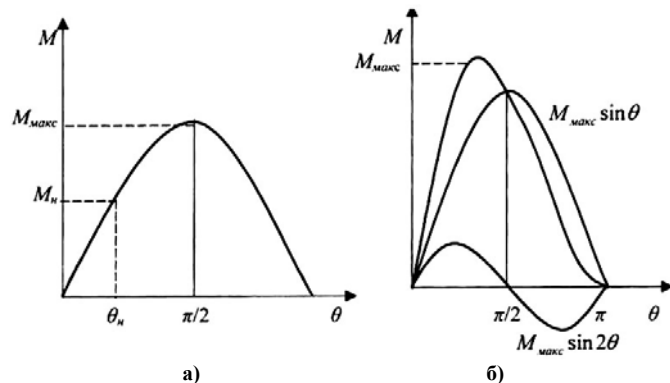


Рис. 3. Кутова характеристика СМПМ: а) неявнополюсного; б) явнополюсного двигуна;  $M_{\max}$  – максимальний момент,  $M_n$  – номінальний моменті  $\theta_n$  – кут навантаження

існувала протягом часу перехідного процесу, пов'язаного зі зміною навантаження.

$$\theta = \frac{\omega_{0el} - \omega p_n}{p} \quad (4)$$

Спочатку момент двигуна збільшується зі зростанням кута навантаження. Коли кут досягає  $90^\circ$ , момент досягає максимуму. Якщо кут навантаження продовжує збільшуватися, тобто двигун переобтяжений, то обертальний момент зменшується, двигун потрапляє в зону нестійкої роботи. Виникає небезпека зриву синхронізації та зупинки ліфта. Дана залежність виражена в кутовій характеристиці, яка наведена на рис. 3.

### Векторне управління синхронним двигуном на постійних магнітах

#### Метод векторної ШПМ

Метод ШПМ, що застосовується для керування автономним інвертором напруги (АІН) для управління двигунами змінного струму, достатньо інтенсивно розвивається в останні десятиліття. Було отримано безліч різних методів ШПМ, метою яких було:

- отримання широкого лінійного діапазону модуляції;
- зменшення втрат на перемикання в транзисторах;
- зменшення вмісту вищих гармонік у вихідній напрузі, що спотворюють його форму [6].

У системах векторного управління застосовується метод векторної ШПМ, який дозволяє збільшити величину вихідної напруги в порівнянні з традиційною скалярною (синусоїдальною) ШПМ, тобто ефективніше використовувати двигун по напрузі, а також зменшити число перемикань ключів перетворювача.

Докладний опис алгоритму управління ключами АІН за допомогою методу векторної ШПМ приведений в [7]. Даний алгоритм оснований на формуванні на кожному часовому інтервалі необхідного положення узагальненого просторового вектору напруги. У разі аналогового джерела живлення для вирішення цього завдання досить сформувати в кожній обмотці напругу, відповідну проекції заданого вектору на вісь обмотки. У разі імпульсного джерела живлення, наприклад, автономного інвертора, можливе формування тільки восьми станів (положень) вектору напруги: шість ненульових (від  $\vec{U}_1$  до  $\vec{U}_6$ ) і два нульових, сформованих інвертором при замиканні непарних ( $\vec{U}_7$ ) і парних ( $\vec{U}_8$ ) ключів. Такі вектори називають базовими. За умови симетрії навантаження амплітуди всіх ненульових базових векторів:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6 = \frac{2}{3} U_d, \quad (5)$$

де  $U_d$  – вхідна напруга інвертора.

Розташування базових векторів  $\vec{U}_1 \dots \vec{U}_6$  показано на рис. 4.

Кожен вектор однозначно характеризується своїм трьохрозрядним двійковим кодом стану.

#### Система векторного управління СМПМ з датчиком положення ротора

Синтез системи векторного управління, яка підтримує складову струму статора  $I_{sd}$  рівною нулю, виконано на основі математичної моделі СМПМ також в системі координат  $(d, q)$ , орієнтованій по магнітній осі ротора. Функціональна схема системи векторного управління СМПМ із заданням на повздовжню складову струму статора  $I_{sd}=0$  зображена на рис. 5.

Нульове завдання струму по осі  $d$  забезпечує напрям струму статора у всіх режимах роботи електродвигуна перпендикулярне магнітній осі ротора. Розглянемо докладніше основні елементи системи векторного управління СМПМ з датчиком положення ротора (ДІР).

*Датчик положення ротора* вимірює кут повороту ротора в межах від  $0$  до  $360^\circ$ . В якості первинного датчик кута може застосовуватися обертовий серсор – резольвер, редуктосин або енкодер. Сьогодні найчастіше використовується енкодер в силу його максимальної розрізняювальної здатності та масо-габаритних показників. Одночасно з кутом, визначається миттєве значення частоти обертання двигуна, яке порівнюється зі встановленою швидкістю. Результат порівняння (різниця) подається на регулятор швидкості.

*Перетворювач координат  $abc \rightarrow dq$* . Даний блок виконує перетворення фазних струмів статора СМПМ з природної трифазної системи координат  $(a, b, c)$  в ортогональну синхронну систему координат  $(d, q)$  відповідно до рівнянь:

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_c) \sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\theta_c) \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

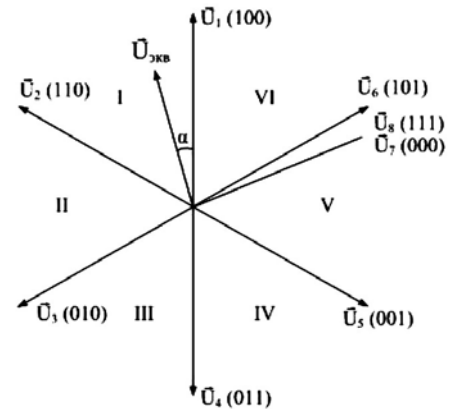
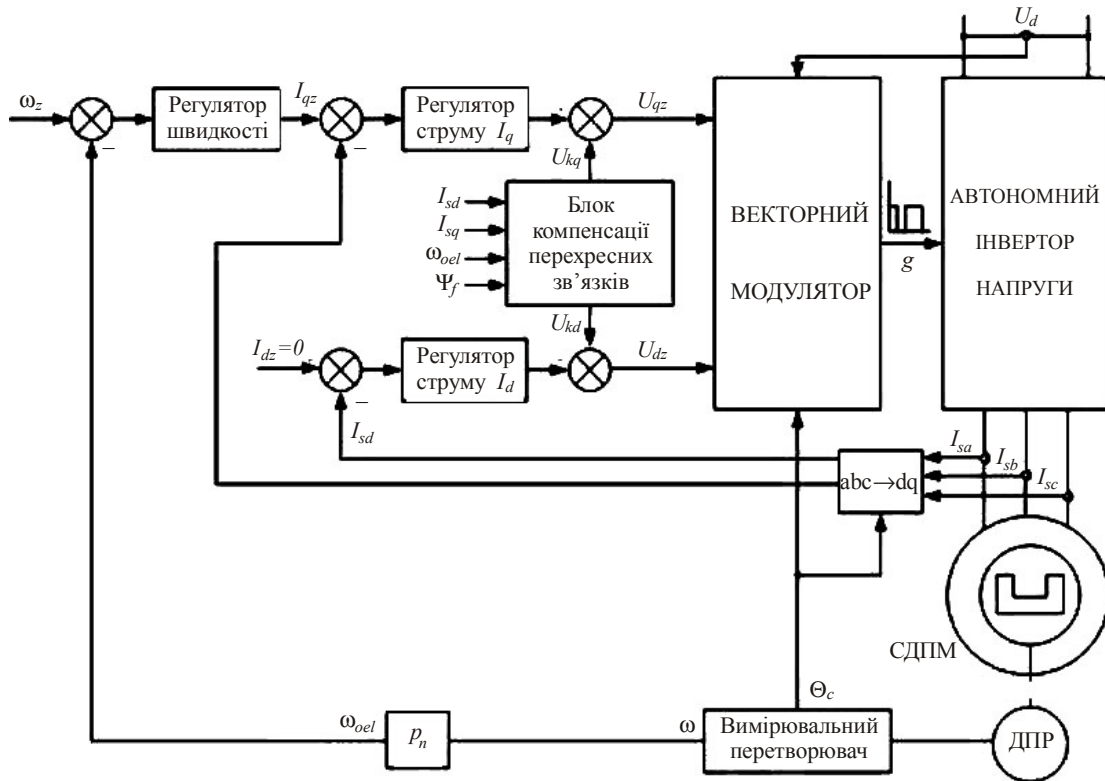


Рис. 4. Векторна діаграма вихідної напруги АІН.  $\vec{U}_{екв}$  – вектор еквівалентної напруги,  $\alpha$  – кут вектора відносно сектора

де  $\Theta_c$  – кутове положення ротора в електричному просторі, для вимірювання якого в схемі присутній ДПР.



**Рис. 5. Функціональна схема системи векторного управління СМПМ:**  $\omega_z, I_{dq}, U_{dq}, U_{qz}$  – задання швидкості, струмів і напруги;  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  – струми фаз статора,  $U_{kd}, U_{kq}$  – компенсаційні складові,  $g$  – ШІМ сигнал, який поступає на АІН

**Векторний модулятор.** Векторний модулятор перетворює напругу статора, задану в системі координат  $(d, q)$ , в імпульси управління ключами інвертора напруги на основі методу векторного формування ШІМ, розглянутого вище. Векторний модулятор виконує наступні операції:

- визначення модуля і фази заданого вектору еквівалентної напруги;
- вибір сектора, в якому розташований вектор еквівалентної напруги;
- визначення кута повороту вектору відносно сектора;
- розрахунок тривалості включення базових векторів;
- отримання імпульсних сигналів управління;
- розподіл сигналів управління по ключах інвертора.

#### Синтез системи бездатчикового управління СМПМ

При проектуванні нових систем керування двигунами перед розробниками все частіше ставиться умова відсутності ДПР, що диктується міркуваннями підвищення надійності, зменшення вартості і простоти обслуговування електродвигуна. Проте у деяких системах використання ДПР для визначення кута положення ротора і миттєвої швидкості просто неприпустимо. Застосування такого методу керування СМПМ є задачею досить складною і не тривіальною.

Для розв'язку цієї задачі введемо поняття спостерігача стану, при цьому спостережуваними координатами є миттєві значення фазної напруги і струмів. Функціональна схема системи бездатчикового управління явнопольосного СМПМ представлена на рис. 6. Слід також вказати, що запропонована система використовується для керування синхронним двигуном із явними полюсами.

Представлена система є модернізацією системи векторного управління з ФП. Окрім спостерігача стану, додатково введені датчики фазної напруги, що подається на статор, і перетворювач координат  $abc \rightarrow dq$  для напруги. Перетворені в обертальну систему координат напруги  $U_{sd}, U_{sq}$  і струми  $I_{sd}$  і  $I_{sq}$  є вхідними змінними для спостерігача стану. На підставі отриманих даних спостерігач видає оцінки швидкості і кута положення.

Розглянута система бездатчикового управління поєднує в собі енергоефективність управління явнопольосним двигуном за рахунок мінімізації струму статора з перевагами бездатчикового управління.

Розглянемо методику побудови адаптивного спостерігача для нашого випадку. В основу адаптивного спостерігача закладемо моделі електромагнітних процесів, що відбуваються в двигуні. Спостерігач будуватиметься у вигляді системи стеження і, окрім моделі, містить додатковий регулятор, який адаптує модель до реальних процесів, що відбуваються в двигуні.

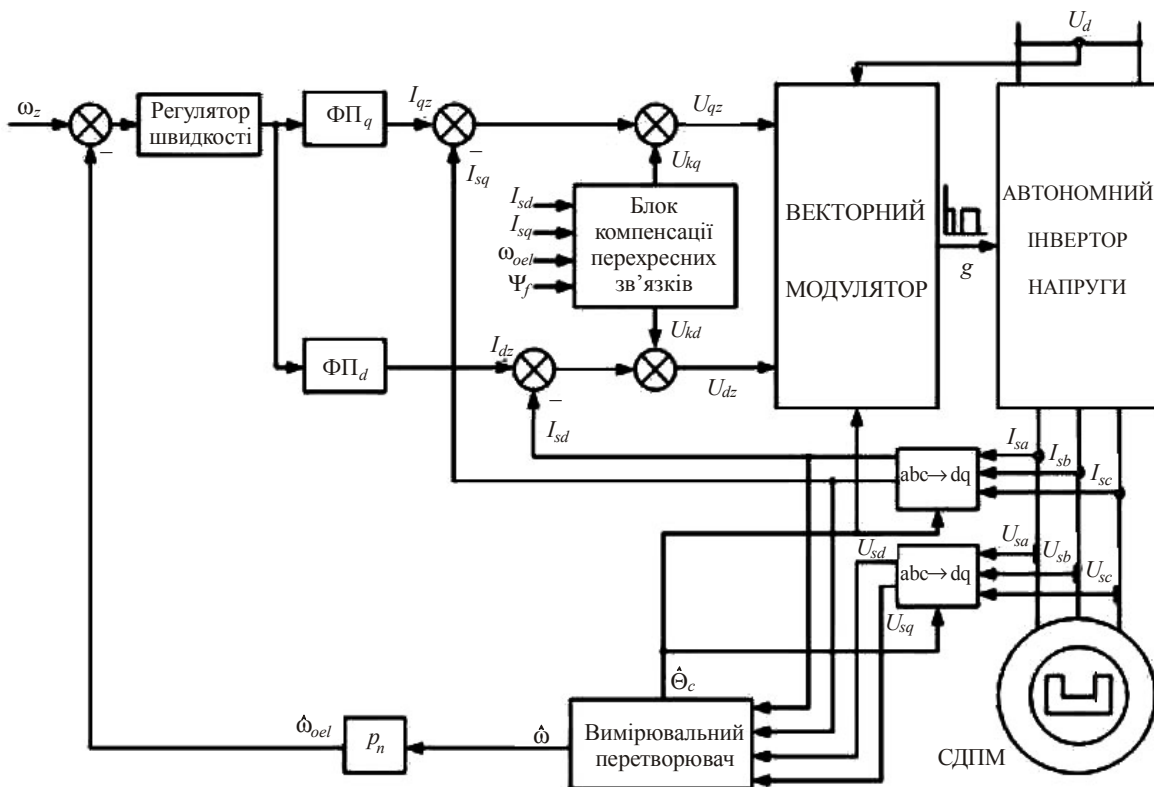


Рис. 6. Функціональна схема системи бездатчикового управління СМПП:

$\hat{\omega}$ ,  $\hat{\omega}_{0el}$ ,  $\hat{\Theta}_c$  – оцінки швидкості обертання ротора, синхронної швидкості і кута положення ротора

Електромагнітні процеси в СМПП описуються в системі координат  $(d, q)$ , орієнтованій по магнітній осі ротора, системою рівнянь (1). Запишемо дану систему в нормальній формі Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{sd}}{dt} &= -\frac{R_s}{L_{sd}} I_{sd} + \omega_{0el} \frac{L_{sq}}{L_{sd}} I_{sq} + \frac{U_{sd}}{L_{sd}}; \\ \frac{dI_{sq}}{dt} &= -\omega_{0el} \frac{L_{sd}}{L_{sq}} I_{sd} - \frac{R_s}{L_{sq}} I_{sq} - \omega_{0el} \frac{\psi_f}{L_{sq}} + \frac{U_{sd}}{L_{sq}} \end{aligned} \quad (7)$$

В матричному вигляді система (7) представлена наступним чином:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{Ax} + \mathbf{BU} \quad (8)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_{sd}} & \omega_{0el} \frac{L_{sq}}{L_{sd}} \\ -\omega_{0el} \frac{L_{sd}}{L_{sq}} & -\frac{R_s}{L_{sq}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{sd} + \frac{\psi_f}{L_{sd}} \\ I_{sq} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{BU} = \begin{pmatrix} \frac{U_{sd} L_{sd} + R_s \psi_f}{L_{sd}^2} \\ \frac{U_{sq}}{L_{sq}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

### Висновки

1. В якості критерію енергоефективності СМПП приймається мінімізація струму статора при заданому моменті навантаженні. Для неявнополюсного СМПП енергоефективним є режим, при якому поздовжня складова струму підтримується рівною 0, а для явнополюсного – забезпечення певного співвідношення між поздовжньою і поперечною складовими струму статора.

2. Для управління ключами АІН при векторному керуванні СМПП застосовується метод векторної ШІМ, який має ряд переваг в порівнянні з традиційною синусоїдальною ШІМ, в тому числі зручність мікропроцесорної реалізації.

3. Системи векторного керування СМПП мають схожу структуру. Відмінністю є способи завдання проєкцій струмів і реалізація отримання зворотних зв'язків для реалізації управління.

4. Реалізація бездатчикового управління вимагає знання швидкості обертання і кута положення ротора. Для вирішення цього завдання може застосовуватися спостерігач стану, який оцінює невідомі змінні параметри машини змінного струму за допомогою відомих (наприклад, фазних струмів і напруг). Адаптивний спостерігач стану містить регулюючий адаптер, який адаптує модель електромагнітних

процесів двигуна до реальних процесів. Такий спостерігач працює як на номінальній швидкості, так і низьких швидкостях.

### Література

1. Стецюк В. І. Рекуперація енергії в ліфтових механізмах / В. І. Стецюк, О. В. Полуденний // 24-а Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція [«Ключові проблеми сучасної науки»], 15–30 вересня 2016, м. Дніпропетровськ. – С. 77–83.
2. Стецюк В. І. Рекуперація енергії в підймальних механізмах з частотно-регульованим електроприводом / В. І. Стецюк, Полуденний О. В. // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2016. – № 5. – С. 253–257.
3. Стецюк В. І. Проблеми модернізації парку ліфтового обладнання / В. І. Стецюк, О. П. Войтюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 25-річчю МНТК “ВОТТП” і 20-річчю МНТЖ “ВОТТП”, 8–13 червня 2017, м. Одеса (Затока). – С. 155–156.
4. Горященко К.Л. Тенденції розвитку сучасної силової елементної бази для керування пристроями легкої промисловості / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – Ч. 1. – С. 174–177.
5. Стецюк В. І. Підвищення ефективності роботи безредукторних електроприводів на базі асинхронного тихохідного двигуна / В. І. Стецюк // Наука и образование : сборник трудов XI Международной научной конференции. – Хайдусобосло, Венгрия, 4–13 января 2018. – С. 18–23.
6. Панкратов В. В. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами : учеб. Пособие / Панкратов В. В., Зима Е. А. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2005. – 120 с.
7. Trzynadlowski A. M., Kirlin R. L., Legowski S. F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997. 44 p.

### References

1. Stetsiuk V. I. Rekuperatsiia enerhii v liftovykh mekhanizmax / V. I. Stetsiuk, O. V. Poludennyi // 24-a Vseukrainska naukovo-praktychna Internet-konferentsiia [«Kliuchovi problemy suchasnoi nauky»], 15–30 veresnia 2016, m. Dnipropetrovsk. – S. 77–83.
2. Stetsiuk V. I. Rekuperatsiia enerhii v pidiimalnykh mekhanizmax z chastotno-rehulovanyim elektropryvodom / V. I. Stetsiuk, Poludennyi O. V. // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2016. – № 5. – S. 253–257.
3. Stetsiuk V. I. Problemy modernizatsii parku liftovoho obladdannia / V. I. Stetsiuk, O. P. Voitiuk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : materialy XVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, prysviachenoi 25-richchii MNTK “VOTTP” i 20-richchii MNTZh “VOTTP”, 8–13 chervnia 2017, m. Odesa (Zatoka). – S. 155–156.
4. Horiashchenko K.L. Tendentsii rozvytku suchasnoi sylovoi elementnoi bazy dlia keruvannia prystroiamy lehkoii promyslovosti / K.L. Horiashchenko, S.L. Horiashchenko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2004. – № 5. – Ch. 1. – S. 174–177.
5. Stetsiuk V. I. Pidvyshchennia efektyvnosti roboty bezreduktornykh elektropryvodiv na bazi asynkronnoho tykhokhidnoho dvyhuna / V. I. Stetsiuk // Nauka y obrazovanye : sbornyk trudov XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsyy. – Khaidusoboslo, Venhryia, 4–13 yanvaria 2018. – S. 18–23.
6. Pankratov V. V. Energooptimalnoe vektornoe upravlenie asinkhronnymi elektropryvodami : ucheb. Posobie / Pankratov V. V., Zima E. A. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2005. – 120 s.
7. Trzynadlowski A. M., Kirlin R. L., Legowski S. F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997. 44 p.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed :25.11.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

## OPTIMIZATION OF A DATASET FOR A MACHINE LEARNING TASK BY CLUSTERING AND SELECTING CLOSEST-TO-THE-CENTROID OBJECTS

*An approach to forming an optimal dataset (either of real-world objects or synthetic ones) for a machine learning task is suggested for when an initial number of objects is significantly greater than required. The proposed approach relies on an appropriately selected algorithm of clustering and a distance. Two cases of the number of objects, at which the training process is presumably close to optimal, are considered. The number may be known beforehand or unknown but included into an interval between the known integers. In this case, the optimal number of objects is determined by using the silhouette criterion. Then the optimal number of objects to be included into the corresponding dataset is the optimal number of clusters at which the maximum of the silhouette criterion function is achieved. For the known-beforehand or determined optimal number of dataset entries, the initial set of objects is clustered, where the number of clusters is equal to that number of dataset entries. In each cluster, the object closest to the cluster centroid is the best one for including it into the dataset. The closeness is treated by the same distance used previously in the silhouette criterion function and clustering. So, the optimal dataset consists of the closest-to-the-centroid objects found by minimizing the distance to the centroid. For relatively small datasets (required, for instance, for transfer learning tasks) of a few hundred entries, the silhouette criterion function performs much faster. If an initial number of objects is too great, it is reasonable to break them into a few groups. A subdataset will be formed from each group by using the same approach of clustering and selecting closest-to-the-centroid objects. In a wider sense, the proposed approach allows to filter surplus objects from a dataset, thus optimizing it. Generally speaking, the clustering here consumes far more resources than selection of closest-to-the-centroid objects. However, an open question is when an initial group of objects should be broken for forming optimal subdatasets. In this way, the clustering can be clustered itself to accelerate optimization of a dataset.*

*Keywords: machine learning, dataset, clustering, distance, cluster centroids, silhouette criterion.*

V.B. ПОМАНЮК  
Військово-морська Академія Польщі, Польща, Гдиня

## ОПТИМІЗАЦІЯ НАБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ШЛЯХОМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ І ВИБОРУ НАЙБЛИЖЧИХ ДО ЦЕНТРОЇДІВ ОБ'ЄКТІВ

*Пропонується підхід до формування оптимального набору даних (реальних або синтетичних об'єктів) для задачі машинного навчання, коли початкове число об'єктів значно більше, ніж потрібно. Запропонований підхід спирається на відповідно обрані алгоритм кластеризації та відстань. Розглянуто два випадки кількості об'єктів, за яких навчальний процес вважається близьким до оптимального. Ця кількість може бути відомою заздалегідь або невідомою, але включеною в інтервал між відомими цілими числами. У цьому випадку оптимальне число об'єктів визначається за допомогою силует-критерію. Тоді оптимальне число об'єктів, що підлягають включенню у відповідний набір даних, — це та оптимальна кількість кластерів, за якої досягається максимум функції силует-критерію. Для відомого заздалегідь або визначеного оптимального числа записів набору даних початкова множина об'єктів кластеризується, де кількість кластерів дорівнює кількості записів набору даних. У кожному кластері об'єкт, найближчий до кластерного центроїда, є найкращим для включення його в набір даних. Близькість тут обробляється на тій же відстані, що використовувалася раніше в функції силует-критерію та кластеризації.*

*Ключові слова: машинне навчання, набір даних, кластеризація, відстань, кластерні центроїди, силует-критерій.*

### Introduction and motivation

Along with computer systems, machine learning has influenced a lot of hardware-based information technologies, including automatics, robotics, telecommunication, credit-card control, etc. Preparation of datasets for machine learning tasks is a quite principal stage in the field. An appropriately prepared dataset is partitioned in training, validation, and testing sets, which define the quality of learning and prediction [1, 2].

The dataset volume required for successful training depends on the task itself and its complexity. For instance, by roughly the same number of classes or categories, image classification tasks are far simpler than tasks of semantic image segmentation [3]. In its turn, scene categorization is usually a more complex task than just classifying images [1, 2, 4, 5]. Building a dataset addresses collecting, selecting, processing, grouping, and labeling data. For small datasets, when no more data are available than a collected amount of entries, a few techniques of data augmentation for training are applied [6, 7].

Some machine learning tasks are based on artificial datasets (e. g., like MNIST, NORB, EEACL26 [2, 5, 6, 8]), which are used for training and testing machine learning models. A dataset wholly generated by computer is also called synthetic. In particular, EEACL26 is a synthetically generated dataset for image classification. It is an infinitely scalable set of grayscale images which can be represented in any size [8, 9]. However, the question is whether an optimal volume of a dataset can be found. If a dataset has many groups of similar objects, then the respective machine learning algorithm may be prone to overfitting, or the training process will not converge properly. Such cases happen to non-synthetic datasets as well. For example, technically different photos of an object, which were made from slight displacements of the camera, bring information equivalent to a single entry rather than a bunch of entries. Although some variations of the entry close to those different photos are generated during augmentation, the initial non-augmented dataset should contain as more original entries as possible. This is

very important for proper validation and final testing, because if there is a group of a few similar entries, the group may be partitioned so that almost the same data will be in the training set and validation set. Eventually, this poor partitioning will cause poor generalization of the respective machine learning algorithm.

Hence, if a number of objects required for successful training is known, a dataset generator (either for synthetic or non-synthetic data) should produce approximately that number of objects which would be as much as dissimilar from each other. Otherwise, an estimation of such a number may be given as an interval. Then the optimal number of objects for the corresponding dataset should be determined first.

**Goal of the article and tasks to be fulfilled**

The goal of the article is to develop an approach to forming an optimal dataset (either of real-world objects or synthetic ones) when an initial number of objects is significantly greater than required. For achieving the article’s goal, the following four tasks are to be fulfilled:

- 1) to circumscribe initial conditions;
- 2) to state breaking an initial set of objects;
- 3) to determine the optimal number of objects for the corresponding dataset, if this number was given initially as an interval;
- 4) to state finding proper objects to be included into the optimal dataset.

**Initial conditions**

Initially, there are two cases:

1. Integer  $N$  is a known number of objects, at which the training process is presumably close to optimal. These objects are presumed to be the most “original” for being the most dissimilar from each other.
2. Integer  $N$  is unknown but  $N \in \{N_{\min}, N_{\max}\}$  by the known integers  $N_{\min}$  and  $N_{\max}$ . The ratio of these integer margins can be any value.

Let  $Q$  be a total number of objects  $\{\mathbf{X}_q\}_{q=1}^Q$ . Object  $\mathbf{X}_q = [x_{qk}]_{1 \times F}$  has  $F$  features represented as a horizontal vector. If the object is an image, its matrix (two-dimensional for grayscale images and three-dimensional for color images) can always be reversibly reshaped to the respective vector.

The initial number of objects  $Q$  is significantly greater than  $N$  (case #1) or  $N_{\max}$  (case #2) but only for the case of synthetic data (or an infinitely scalable dataset) they certainly represent all classes or categories. In some cases of non-synthetic data, these  $Q$  objects will not cover the whole number of categories. This is, for instance, when a few distinct objects have a lot of similar images made from slight displacements of the camera, whereas some other distinct objects of interest are represented normally. Then the dataset optimality is understood in the sense of filtering surplus images in a few classes, although the subsequent training on such an optimal dataset is not necessary to be successful.

**Breaking the initial set of objects**

When number  $N$  of proper objects to be included into the optimal dataset is known, the task is to break the initial set of objects  $\{\mathbf{X}_q\}_{q=1}^Q$  into  $N$  groups (or clusters). Subsequently, the best object in each cluster will be selected. The criterion of the selection is going to be stated later.

In formal entries, breaking set  $\{\mathbf{X}_q\}_{q=1}^Q$  into  $N$  clusters is equivalent to mapping set  $\{\mathbf{X}_q\}_{q=1}^Q$  into a set

$$\left\{ \left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i} \right\}_{i=1}^N \text{ by } \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q \cap \left\{ \left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i} \right\}_{i=1}^N = \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q \text{ and } \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q \cup \left\{ \left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i} \right\}_{i=1}^N = \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q, \tag{1}$$

where  $m_i$  objects  $\left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i}$  constitute the  $i$ -th cluster,  $i = \overline{1, N}$  and  $\sum_{i=1}^N m_i = Q$ . The mapping is written as

$$\left\langle \left\{ \left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i} \right\}_{i=1}^N, \left\{ \mathbf{C}_i \right\}_{i=1}^N \right\rangle = a \left( \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q, N, \rho_{\mathbb{R}^F} \right) \tag{2}$$

by a chosen distance  $\rho_{\mathbb{R}^F}$  in  $\mathbb{R}^F$  and a specific algorithm of clustering denoted by  $a \left( \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q, N, \rho_{\mathbb{R}^F} \right)$  that returns also centroid  $\mathbf{C}_i$  of the  $i$ -th cluster,  $i = \overline{1, N}$ . In general, centroid  $\mathbf{C}_i = [c_{ik}]_{1 \times F}$  is not one of objects  $\left\{ \mathbf{X}_i^{(j)} \right\}_{j=1}^{m_i}$  of the  $i$ -th cluster [10, 11].

**Determining the optimal number of objects for the corresponding dataset**

In case #2, when number  $N$  of proper objects to be included into the optimal dataset is unknown but  $N \in \{N_{\min}, N_{\max}\}$ , the optimal number of objects is determined by using the silhouette criterion [12]. This criterion returns a silhouette value  $v(n)$  for  $n$  clusters:

$$v(n) = s \left( n, a \left( \left\{ \mathbf{X}_q \right\}_{q=1}^Q, n, \rho_{\mathbb{R}^F} \right) \right) \text{ by } n = \overline{N_{\min}, N_{\max}} \tag{3}$$

where the right-side term is the silhouette criterion function. Then the optimal number of clusters is

$$N \in \arg \max_{n=N_{\min}, N_{\max}} v(n) \tag{4}$$

that is the optimal number of objects to be included into the corresponding dataset. Along with number (4), mapping



(2) inside silhouette criterion function (3) gives centroids  $\{C_i\}_{i=1}^N$  and clustered objects  $\{X_i^{(j)} = [x_{ik}^{(j)}]_{k=1}^F\}_{j=1}^{m_i}$ .

### Finding proper objects to be included into the optimal dataset

Obviously, centroids  $\{C_i\}_{i=1}^N$  cannot be taken as entries to the dataset, unless they coincide with objects. In each cluster, the object closest to the cluster centroid is the best one for including it into the dataset. The closeness should be treated by the same distance used in mapping (2) and silhouette criterion function (3). Thus,

$$X_i^* \in \arg \min_{X_i^{(j)}, j=1, m_i} \rho_{\mathbb{R}^F}(X_i^{(j)}, C_i) = \arg \min_{X_i^{(j)}, j=1, m_i} \|X_i^{(j)} - C_i\| \quad (5)$$

is the representative of the  $i$ -th cluster. The distance can be commonly

$$\rho_{\mathbb{R}^F}(X_i^{(j)}, C_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^F (x_{ik}^{(j)} - c_{ik})^2} \quad (6)$$

or

$$\rho_{\mathbb{R}^F}(X_i^{(j)}, C_i) = \sum_{k=1}^F |x_{ik}^{(j)} - c_{ik}| \quad (7)$$

or other suitable for a specific task.

### Discussion and conclusion

So, the optimal dataset consists of objects  $\{X_i^*\}_{i=1}^N$  found by (5). With the chosen distance, they are defined by centroids  $\{C_i\}_{i=1}^N$  which depend also on the algorithm of clustering. Determining the optimal number by (4) is a time-consuming process, especially if  $N_{\min}$  and  $N_{\max}$  are of order of thousands. Nonetheless, for relatively small datasets (required, for instance, for transfer learning tasks [4]) these integers are of order of hundreds. Then, as series of experiments prove, the silhouette criterion function by (3) performs much faster. If an initial number of objects is too great, it is reasonable to break them into a few groups. A subdataset will be formed from each group by using the same approach of clustering and selecting closest-to-the-centroid objects.

The proposed approach to forming the optimal dataset relies on an appropriately selected algorithm of clustering and a distance. In a wider sense, the approach allows to filter surplus objects from a dataset, thus optimizing it. The clustering consumes far more resources than selection of closest-to-the-centroid objects. However, an open question is when an initial group of objects should be broken for forming optimal subdatasets. In this way, the clustering can be clustered itself to accelerate optimization of a dataset.

### References

1. Witten I. H., Frank E., Hall M. A., Pal C. J. Data Mining (Fourth Edition). Chapter 10 — Deep learning / Morgan Kaufmann, 2017. — P. 417 — 466.
2. Romanuke V. V. Appropriateness of DropOut layers and allocation of their 0.5 rates across convolutional neural networks for CIFAR-10, EEACL26, and NORB datasets // Applied Computer Systems. — 2017. — Vol. 22. — P. 54 — 63.
3. He H.-J., Zheng C., Sun D.-W. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation (Second Edition). Chapter 2 — Image Segmentation Techniques / Academic Press, 2016. — P. 45 — 63.
4. Bai S., Tang H. Softly combining an ensemble of classifiers learned from a single convolutional neural network for scene categorization // Applied Soft Computing. — 2018. — Vol. 67. — P. 183 — 196.
5. Romanuke V. V. Appropriate number and allocation of ReLUs in convolutional neural networks // Research Bulletin of NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”. — 2017. — No. 1. — P. 69 — 78.
6. Romanuke V. V. Training data expansion and boosting of convolutional neural networks for reducing the MNIST dataset error rate // Research Bulletin of NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”. — 2016. — No. 6. — P. 29 — 34.
7. Lv J.-J., Shao X.-H., Huang J.-S., Zhou X.-D., Zhou X. Data augmentation for face recognition // Neurocomputing. — 2017. — Vol. 230. — P. 184 — 196.
8. Romanuke V. V. Two-layer perceptron for classifying flat scaled-turned-shifted objects by additional feature distortions in training // Journal of Uncertain Systems. — 2015. — Vol. 9, No. 4. — P. 286 — 305.
9. Romanuke V. V. Optimal training parameters and hidden layer neurons number of two-layer perceptron for generalized scaled objects classification problem // Information Technology and Management Science. — 2015. — Vol. 18. — P. 42 — 48.
10. Nylen E. L., Wallisch P. Neural Data Science. Chapter 9 — Classification and Clustering / Academic Press, 2017. — P. 249 — 276.
11. Larsson C. 5G Networks. Chapter 6 — Clustering / Academic Press, 2018. — P. 123 — 141.
12. Campello R. J. G. B., Hruschka E. R. A fuzzy extension of the silhouette width criterion for cluster analysis // Fuzzy Sets and Systems. — 2006. — Vol. 157, Iss. 21. — P. 2858 — 2875.

Рецензія/Peer review : 9.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 29.11.2018 р.

Рецензент:

## ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(1)-266-270

УДК 65.011.56

Є.Є. ВОЛКАНІН, С.М. БОЙКО, О.Ф. КРИШАН  
Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету  
С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, О.М. НАНАКА  
Вінницький національний технічний університет

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИСОКОГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ

Останнім часом магнітна сепарація знаходить широке застосування в таких областях науки, як молекулярна та клітинна біологія, мікробіологія, біохімія і нанотехнологія. Біологічна магнітна сепарація з використанням магнітних адсорбентів, модифікаторів і контейнерів застосовується для іммобілізації, ізоляції та видалення біологічно активних сполук і клітин [7].

У порівнянні з традиційним методом центрифугування технологія магнітної сепарації більш продуктивна, а також не вимагає складного і високовартісного обладнання. За допомогою магнітної сепарації обробляється широкий спектр речовин – від частинок відносно великих розмірів до колоїдних і наночастинок, від феромагнітних до парамагнітних і суперпарамагнітних. Крім того, магнітна сепарація – екологічно безпечна технологія.

За останні десятиліття техніка високоградієнтної магнітної сепарації (ВГМС) отримала широке поширення. До появи технології ВГМС можна було розділяти матеріали, що містять один-три сильномагнітних елемента: залізо, нікель, кобальт.

В роботі описані призначення, принципи роботи та галузі застосування високоградієнтних магнітних сепараторів. Такі сепаратори здатні розділяти слабомагнітні та парамагнітні частинки мікро і нанорозмірів. Подібні системи знаходять застосування у біомедицині, фармацевтичній галузі, онкології. Принцип відокремлення частинок полягає у захопленні більш магнітної фракції феромагнітною матрицею, розташованою в робочому проміжку магнітної системи. Матриця при намагнічуванні формує високі значення локального градієнту магнітного поля, що характеризується значною силою вилучення. Розглянута сепараційна система вимагає гнучкого і точного регулювання її режимів. Для реалізації цього пропонується застосувати штучну нейронну мережу.

Ключові слова: магнітна сепарація, магнітна частинка, високоградієнтна магнітна сепарація, високоградієнтне магнітне поле, штучна нейронна мережа, автоматизована система управління.

E.E. VOLOKANIN, S.M. BOIKO, O.F. KRYSHAN  
Kremenchuk Flight College of the National Aviation University  
S.YA. VYSHNEVSKIY, O.M. NANAKA  
Vinnytsia National Technical University

## AUTOMATION OF HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATORS

Recently, magnetic separation is widely used in such areas of science as molecular and cellular biology, microbiology, biochemistry and nanotechnology. Biological magnetic separation which use magnetic adsorbents, modifiers and containers is used to immobilize, isolate and remove biologically active compounds and cells [7]. Compared with the traditional centrifugation method, magnetic separation technology is more productive, and does not require complicated and expensive equipment. With the help of magnetic separation, a wide range of substances is processed - from particles of relatively large size to colloidal and nanoparticles, from ferromagnetic to paramagnetic and superparamagnetic. In addition, magnetic separation is an environmentally safe technology. Over the past decade, technology of high-gradient magnetic separation (HGMS) has been widespread. Before the HGMS technology appeared it could be possible to separated materials containing one to three strong-magnetic elements: iron, nickel, cobalt. The work describes the purpose, working principles and applications of high-gradient magnetic separators. Such separators are capable of separating weakly magnetic and paramagnetic particles of micro and nanosizes. Such systems are used in biomedical, pharmaceutical, oncology. The separation principle of particles is based on capturing a more magnetic fraction with a ferromagnetic matrix located in the working space of the magnetic system. The matrix under magnetization produced high values of the local gradient of the magnetic field, which characterized by considerable force of extraction. The considered separation system requires flexible and precise regulation of its modes. To implement this, it is proposed to use an artificial neural network.

Key words: magnetic separation, magnetic particle, high gradient magnetic separation, high gradient magnetic field, artificial neural network, automated control system.

## Вступ

Нанотехнологія є однією з галузей знань, що найбільш динамічно розвиваються. Ця галузь оперує об'єктами, розмір яких знаходиться в діапазоні 1...100 нм, і характеризується міждисциплінарними теоретичними та практичними науковими розробками. Застосування нанопрепаратів на основі магнітних наночастинок відкриває нові можливості в медицині при діагностиці та лікуванні низки онкологічних захворювань.

Зростання наукового інтересу до магнітних наноматеріалів пов'язаний із можливістю дистанційного керування наночастинами і конструкціями на їх основі при накладанні зовнішнього магнітного поля [1].

У біомедицині магнітні наночастинки використовуються для [2]:

- біомагнітної сепарації [3];

- цільової доставки лікарських засобів [4];
- керованої локальної гіпертермії [5];
- візуалізації при діагностиці і лікуванні в онкології [6].

Рекомендований розмір наночастинок для медичного застосування становить: біомагнітна сепарація і гіпертермія – 40 ... 60 нм; цільова доставка лікарських засобів та візуалізація – 20 ... 80 нм. Для отримання фракцій з потрібним розміром частинок і видалення надлишку поверхнево-активних речовин може бути застосована магнітна сепарація, оскільки фракції значно розрізняються за магнітними властивостями.

#### Аналіз попередніх досліджень

Сьогодні за допомогою потужних високоградієнтних сепараторів можна сепарувати 55 слабомагнітних елементів таблиці Менделєєва, що знаходяться в незліченних кількостях сполук.

Система ВГМС [8] застосовувалася для очищення стічних вод металургійного заводу. Сепараційний камера сепаратора виконана у вигляді циліндра з розташованими всередині феромагнітними стрижнями. Камера розміщена в магнітному полі, яке генерується постійними магнітами.

Також технологія ВГМС парамагнітних мікрочастинок застосовується при обробці глини, залізних руд і промислових мінералів.

Нанорозмірний магнетит [9] (розмір ~ 10 нм) застосовувався в якості адсорбенту для очищення води. Конструктивно система ВГМС складалася із каналу, що містить феромагнітний матеріал – сталеву шерсть, яка оточена електромагнітами.

Матриця зі сталеві нержавіючої вовни також застосовується в лабораторних високоградієнтних сепараторах для очищення біологічних рідин із застосуванням нанорозмірного магнетиту [10].

У біотехнології застосовуються комерційні зразки ВГМС, призначені для сепарації клітин, помічених магнітним наномаркером (суперпарамагнітні наночастинок діаметром ~5 нм, що мають в своєму складі високоспецифічні моноклональні антитіла) [11].

#### Мета роботи

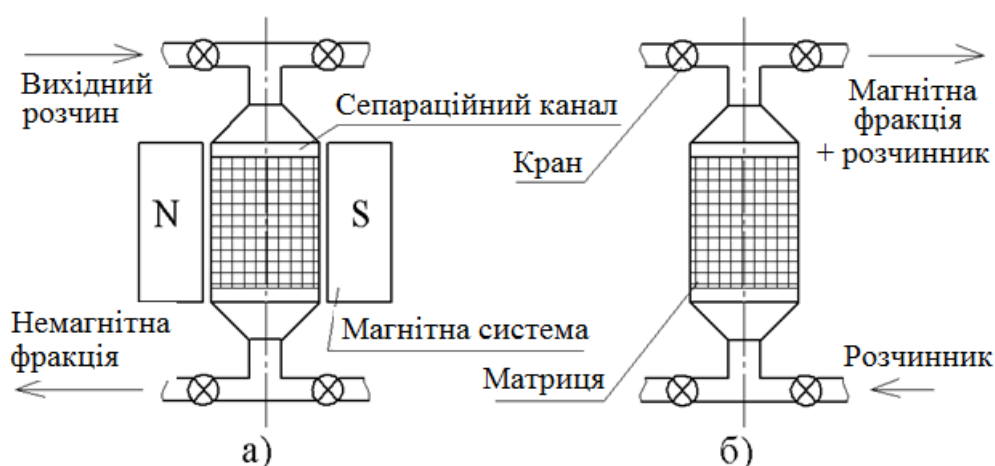
Мета роботи полягає в розробці методів автоматизованого контролю магнітних і режимних параметрів системи високоградієнтної магнітної сепарації. До режимних параметрам відносять швидкості потоку у відповідних точках сепараційного каналу. До магнітних параметрів, які необхідно контролювати в процесі сепарації, слід віднести значення напруженості і градієнта напруженості магнітного поля.

#### Матеріал і результати дослідження

Системи високоградієнтної магнітної сепарації призначені для розділення мікронних, нанорозмірних і слабомагнітних матеріалів. Високоградієнтна магнітна сепарація – це технологія вилучення магнітної фракції в рідкому середовищі за допомогою високоградієнтних магнітних полів. Високі значення градієнта досягаються спотворенням магнітного поля феромагнітною матрицею. Форма, розмір і матеріал матриці грають вирішальну роль в досягненні ефективного розподілу фракцій, крім того, не менше важливим фактором є режимні параметри, такі як швидкість потоку, напруженість магнітного поля, своєчасне розвантаження матриці від захоплених магнітним полем частинок.

Принцип дії ВГМС зводиться до захоплення дрібних частинок (магнітних, парамагнітних) феромагнітною матрицею, що розташована в сильному магнітному полі. Матриця, концентруючи вторинне поле, дозволяє досягти високих градієнтів магнітної індукції в каналі сепарації. В якості матриці застосовуються рифлені пластини, феромагнітні кульки (поліградієнтна сепарація), сталеве волокно або феромагнітні дроти (стрижні), орієнтовані певним чином в робочому обсязі. Магнітне поле створюється електромагнітною системою або системою постійних магнітів.

Високоградієнтний сепаратор складається із магнітної системи та сепараційного каналу з матрицею. Технологічний процес ВГМС (рис. 1) складається із циклів вилучення і відмивання. Перемикання режимів роботи здійснюється кранами та вимиканням магнітної системи.



Цикл вилучення: вихідний розчин прокачується насосом через сепараційний канал. Магнітні частинки під дією поля затримуються на елементах матриці, а немагнітні безперешкодно проходять сепараційний канал. Цикл відмивання: сепараційний канал звільняється від магнітної системи (або магнітне поле вимикається при застосуванні електромагнітів), а через матрицю прокачується розчинник (або вода). Отриманий розчин буде містити магнітні частинки.

Вихідними даними для проектування системи ВГМС є:

- параметри вихідного препарату (динамічна в'язкість розчинника, концентрація, розмір, намагніченість насичення та магнітна сприйнятливості магнітних частинок);
- необхідна продуктивність сепараційної системи.

Для автоматизованого управління процесом сепарації необхідно розмістити в сепараційній системі оптичні датчики швидкості потоку рідини (рис. 2, поз. 1) та магнітні датчики напруженості поля (рис. 2, поз. 2).

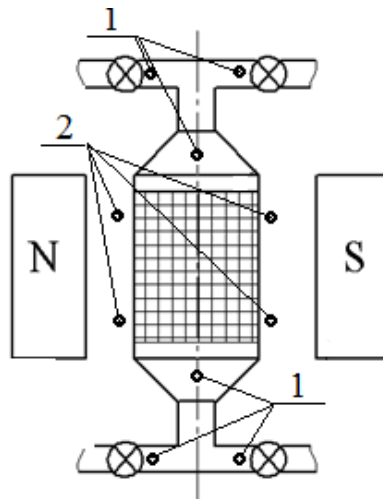


Рис. 2. Сепараційна система з датчиками

Процес сепарації полягає у підтриманні відповідного режиму шляхом регулювання продуктивності перистальтичних насосів (рис. 3, поз. 1), напруженості поля в робочому проміжку магнітної системи (рис. 3, поз. 2) та положення кранів у трубопроводах (рис. 3, поз. 3).

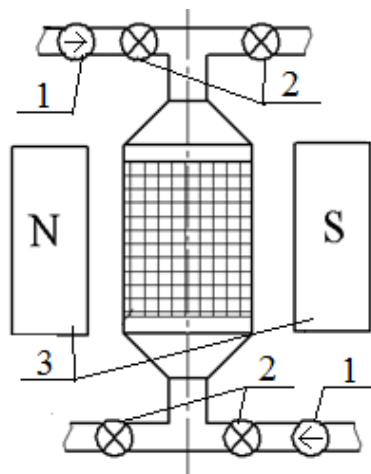


Рис. 3. Механізми керування процесом сепарації

Отримання продуктів сепарації які відповідають технічному завданню не можливе без застосування автоматизованої системи керування. Найбільш сучасні системи керування проектуються на базі штучних нейронних мереж. Сучасні інформаційні системи управління вирішують наступні задачі: класифікація образів, кластеризація, апроксимація функцій, прогнозування, оптимізація та управління. Автоматизоване управління є найскладнішою задачею, оскільки вимагає рішення ряду інших допоміжних завдань. Істотно поліпшити якість управління складними об'єктами дозволяють системи управління, що базуються на сучасних інформаційних технологіях, таких як нейронні мережі. Основна відмінність таких інтелектуальних систем – наявність механізму системної обробки даних та можливість їх отримання, зберігання і обробки.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) це обчислювальна структура, що складається із великої кількості однотипних елементів, кожен з яких виконує відносно прості функції. Елементарним функціональним модулем ШНМ є штучний нейрон, математичну модель якого можна представити як [12]:

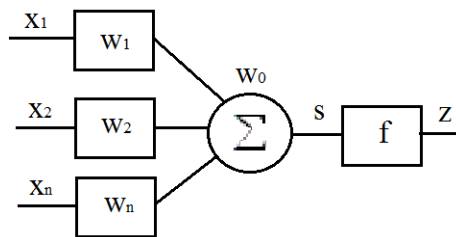


Рис. 4. Математична модель нейрона:  $x_i$  – вхідний сигнал нейрона;  $w_0$  – зміщення;  $w_i$  – вага  $i$ -го зв'язку;  $f$  – активаційна функція нейрона;  $s$  – сигнал, одержуваний на виході суматора;  $z$  – вихідний сигнал нейрона

Сигнал на виході суматора:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0. \quad (1)$$

Тоді вихідний сигнал нейрона:

$$z = f(s). \quad (2)$$

Штучний нейрон працює наступним чином: вхідні сигнали  $x_i$  надходять на блоки, що реалізують функцію синапсів. Кожен із них характеризується своїм ваговим коефіцієнтом  $w_i$  (синаптичною вагою); зважені вхідні сигнали подаються на лінійний суматор, після чого результат їх складання надходить на блок активаційної функції; активаційна функція формує вихідний сигнал нейрона. Модель нейрона також включає в себе зміщення  $w_0$ , яка додається до вхідного сигналу блоку активаційної функції. Активаційна функція нейрона  $f$  визначає нелінійне перетворення, здійснюване нейроном.

ШНМ складається із сукупності розташованих по шарах і пов'язаних між собою нейронів. Для системи ВГМС найбільш ефективною буде застосування тришарової штучної нейронної мережі (рис. 5).

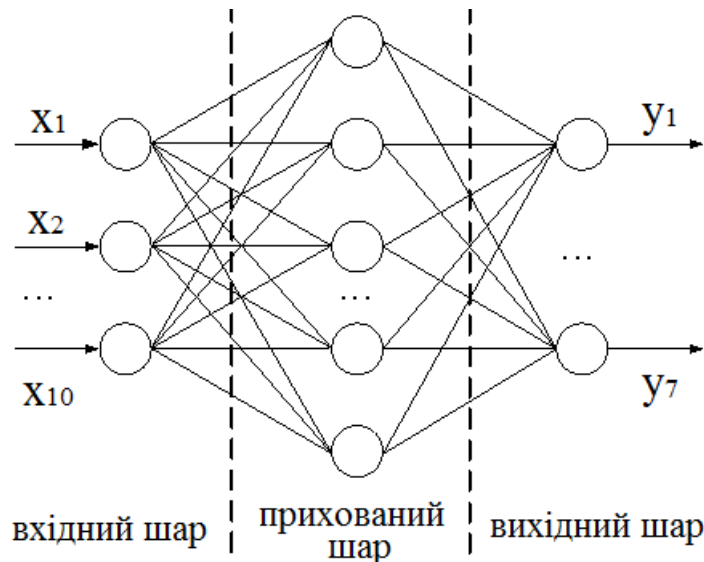


Рис. 5. Тришарова нейронна мережа керування системою ВГМС

Вхідний шар містить 10 нейронів (10 вхідних сигналів від оптичних датчиків потоку та магнітних датчиків напруженості поля), а вихідний – 7 нейронів (7 вихідних сигналів керування положеннями кранів, продуктивності перистальтичних насосів та інтенсивності магнітного поля). Нейрони вхідного шару в такій мережі просто ретранслюють вхідні сигнали ( $x_i$ ) на прихований шар не перетворюючи їх. У прихованих нейронах послідовно, шар за шаром, відбувається нелінійне перетворення сигналів. Сигнали з останнього прихованого шару надходять на нейрони вихідного шару, які формують реакції мережі ( $y_i$ ).

#### Висновок

Система ВГМС, що розглядається, автоматизована системою керування на базі нейронної мережі, призначена для ефективного розділення мікронних та нанометрових частинок в потоці рідини. Особливістю ШНМ є її здатність до навчання – процесу, при якому вільні параметри нейронної мережі адаптуються в результаті її безперервної стимуляції зовнішнім оточенням. Подальші дослідження полягатимуть у розробці типу навчання системи керування, при якому формуються зміни параметрів вхідних і вихідних сигналів.

#### Література

1. Pedro, Tartaj, Mar'ia del Puerto, Morales, Sabino, Veintemillas-Verdaguer, Teresita Gonz'alez-Carreno, Carlos J. Serna (2003), "The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine", *Journal of Physics D. Applied Physics*, 36, R182–R197.
2. Волканін Є. Є. Магнітні наночастинки: методи отримання, властивості, магнітна сепарація та

використання в біомедицині / Є. Є. Волканін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 6/2008 (53), част. 2. – С. 49–53.

3. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles", American Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

4. Ito, A., Shinkai, M., Honda, H., and Kobayashi, T., (2005), "Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review", J. Bioscience Bioengineering, iss. 100, no. 1, pp. 1–11.

5. Кириленко А. В. Движение магнитных наночастиц в потоке жидкости при наложении постоянного магнитного поля / А. В. Кириленко, В. Ф. Чехун, А. Д. Подольцев // Доповіді Національної академії наук України. – 2012. – № 2. – С. 186–195.

6. Katerina Kluchova, Radek Zboril, Jiri Tucek, Michaela Pecova, [et all.] (2009), "Superparamagnetic maghemite nanoparticles from solid-state synthesis. – Their functionalization towards peroral MRI contrast agent and magnetic carrier for trypsin immobilization", Biomaterials, no. 30, pp. 2855–2863.

7. Brian Dennis Plouffe (2011), "Magnetic particle based microfluidic separation of cancer cells from whole blood for applications in diagnostic medicine", Northeastern University, Chemical Engineering Dissertations, Department of Chemical Engineering.

8. Matthias Franzreb, Uwe Habich, Gerhard Resch (2002), „Magnetic filters on duty for cleaner metallic surfaces“, Institute for Technical Chemistry, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Steinert Elektromagnetbau GmbH Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, Geound Wassertechnologie 1, Jahrgang, Heft 3, S. 66–75.

9. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles", American Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

10. Paul C. Owings (2009), High Gradient Magnetic Separation of nanoscale magnetite: a thesis : Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Publication Date : 2011, Graduation Month: August.

11. Синчук О. Н. Нейронные сети и управление процессом управления электроснабжением объектов от комбинированных электрических сетей / О. Н. Синчук, С. Н. Бойко // Технічна електродинаміка. – 2014. – №. 5. – С. 53–55.

12. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004.

#### References

1. Pedro, Tartaj, Mar'ia del Puerto, Morales, Sabino, Veintemillas-Verdaguer, Teresita Gonz'alez-Carreno, Carlos J. Serna (2003), "The preparation of magnetite nanoparticles for applications in biomedicine", Journal of Physiss D. Applied Physiss, 36, R182–R197.

2. Volkanin Ye. Ye. Mahnitni nanochastynky: metody otrymannia, vlastyvoosti, mahnitna separatsiia ta vykorystannia v biomedysyni / Ye. Ye. Volkanin // Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2008. – Vyp. 6/2008 (53), chast. 2. – S. 49–53.

3. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetis Separation of Coated Magnetis Nanopartises", Amerisan Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

4. Ito, A., Shinkai, M., Honda, H., and Kobayashi, T., (2005), "Medisal applisiation of funstionalized magnetis nanopartises. Review", J. Biossiense Bioengineering, iss. 100, no. 1, pp. 1–11.

5. Kirilenko A. V. Dvijenie magnitnyih nanochastits v potoke jidkosti pri nalozhenii postoyannogo magnitnogo polya / A. V. Kirilenko, V. F. CHehun, A. D. Podoltsev // Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini. – 2012. – № 2. – С. 186–195.

6. Katerina Klushova, Radek Zboril, Jiri Tusek, Mishaela Pesova, [et all.] (2009), "Superparamagnetis maghemite nanopartises from solid-state synthesis. – Their funstionalization towards peroral MRI sontrast agent and magnetis sarrier for trypsin immobilization", Biomaterials, no. 30, pp. 2855–2863.

7. Brian Dennis Plouffe (2011), "Magnetis partisle based misrofluidis separation of sanser sells from whole blood for applisations in diagnostis medisine", Northeastern University, Chemisal Engineering Dissertations, Department of Chemisal Engineering.

8. Matthias Franzreb, Uwe Habish, Gerhard Resh (2002), „Magnetis filters on duty for sleaner metallis surfases“, Institute for Teshniscal Chemistry, Forsshungszentrum Karlsruhe GmbH Steinert Elektromagnetbau GmbH Nashrishten aus dem Institut für Teshnisshe Chemie, Geound Wasserteshnologie 1, Jahrgang, Heft 3, S. 66–75.

9. Moeser, G.D. Hatton, T.A., Kaitlin, A.R., William, H.G. (2004), "High-Gradient Magnetis Separation of Coated Magnetis Nanopartises", Amerisan Institute of Chemical Engineers, vol. 50, pp. 2835–2848.

10. Paul C. Owings (2009), High Gradient Magnetis Separation of nanossale magnetite: a thesis : Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Publisation Date : 2011, Graduation Month: August.

11. Sinchuk O. N. Neyronnyie seti i upravlenie protsessom upravleniya elektrosnabjeniem obyektov ot kombinirovannyih elektricheskikh setey / O. N. Sinchuk, S. N. Boyko // Tehnichna elektrodinamika. – 2014. – №. 5. – S. 53–55.

12. Uskov A.A. Intellektualnyie tehnologii upravleniya. Iskustvennyie neyronnyie seti i nechetkaya logika / A.A. Uskov, A.V. Kuzmin. – М. : Goryachaya liniya – Telekom, 2004.

Рецензія/Peer review : 19.10.2018 р.

Надрукована/Printed :23.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н. проф. Болюх В.Ф.

## СХЕМА РОЗРАХУНКУ ДИСКОВОГО П'ЄЗОЕЛЕМЕНТА З ЧАСТКОВИМ ЕЛЕКТРОДУВАННЯМ ПОВЕРХОНЬ

*В роботі дано загальне формулювання граничної задачі про розрахунок скалярного потенціалу вісесиметричного електричного поля в диску, матеріал якого має анізотропну діелектричну проникність, яка мінімум на порядок перевершує діелектричну проникність вакууму. Запропоновано схему рішення задачі для випадку, коли розташовані на торцевих поверхнях диска електроди мають форму співвісно розташованих круга та кільця, причому зовнішній радіус кільця дорівнює радіусу діелектричного диска, а радіус круга збігається з внутрішнім радіусом кільця. Запропонована схема використовує метод послідовних наближень, що дозволяє отримати аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів в математичному описі потенціалу електричного поля.*

*Ключові слова:* скалярний потенціал, анізотропія діелектричної проникності, часткове електродування поверхонь, діелектричний диск.

C.V. BAZILO

Cherkasy State Technological University

## CALCULATION SCHEME OF DISK PIEZOELECTRIC ELEMENT WITH SURFACES PARTIALLY COVERED BY ELECTRODES

*Thanks to its unique properties piezoceramics has applications in various fields of engineering and technology. Piezoelectric disks with partial electrodes of one or two surfaces are often used to create various functional piezoelectronic devices. Disk piezoelectric devices are widely used in the elements of information systems. In disk piezoelectric elements with surfaces partially covered by electrodes we can simultaneously excite oscillations of compression-tension and transverse bending vibrations. Manipulating the geometric parameters of electrodes and their location relative to each other, you can have a significant effect on the energy of oscillatory motion particular type of material particles of piezoelectric disk volume. The multiplicity and variety of the practical application of disks with surfaces partially covered by electrodes naturally stimulates theoretical studies, the purpose of which is to predict the characteristics and technical parameters of piezoelectronic devices that are created on their basis. The paper presents the general formulation of the boundary problem of the scalar potential calculation of the axially symmetric electric field in the disk, the material of which has an anisotropic dielectric constant that is at least an order higher than the dielectric constant of vacuum. It is proposed a scheme for solving the problem in the case when the electrodes placed on the end surfaces of the disk have the shape of coaxially located circle and ring, and ring outer radius equal to the radius of the dielectric disk, while the radius of the circle coincides with the inner radius of the ring. The proposed scheme uses the method of sequential approximations that allows to obtain analytical expressions for the coefficients in the mathematical description of the electric field potential.*

*Key words:* scalar potential, anisotropy of dielectric constant, surfaces' partial covering by electrodes, dielectric disk.

### Вступ

Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в силових і інформаційних системах пояснюється, перш за все, їх високою надійністю [1]. Діскові п'єзоелементи з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для побудови різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки [2]. П'єзоелектричні диски з секторним електродуванням поверхні є практично основним елементом багатьох мікроелектромеханічних систем [3]. В дискових п'єзоелектричних елементах з частковим електродуванням поверхні можна одночасно збуджувати коливання стиснення-розтягування і коливання поперечного вигину. Маніпулюючи геометричними параметрами електродів і їх розташуванням один відносно одного, можна робити істотний вплив на енергетику того чи іншого типу коливальних рухів матеріальних частинок об'єму п'єзоелектричного диска. Якщо домінують коливання поперечного вигину, то дисковий п'єзоелектричний елемент може використовуватися як низькочастотний випромінювач акустичних хвиль. Якщо один з електродів піддати спеціальній обробці з метою додання йому якостей відбивача світлових променів, то дисковий п'єзоелектричний елемент з частковим електродуванням поверхні може використовуватися як фокусуєний дефлектор світлового потоку. При цьому особливо слід наголосити на тому, що даний п'єзоелектричний елемент володіє сумісністю з мікросистемними технологіями, тобто може бути виготовлений як мікроелектромеханічні структури (MEMS) [3].

Якщо часткове електродування виконано з порушенням осьової симетрії всієї конструкції, то відкриваються додаткові можливості по управлінню параметрами напружено-деформованого стану п'єзоелектричного диска і передавальними характеристиками електромеханічної системи в цілому.

Все сказане вище є досить вагомою мотивацією для дослідження параметрів і характеристик динамічних електропружних полів в об'ємі дискових п'єзоелектричних елементів з частковим електродуванням поверхонь.

В роботі [4] викладена загальна схема математичного моделювання процесів в п'єзоелектричних елементах з частковим електродуванням поверхонь. Слідуючи викладеним в цій роботі принципам розрахунку п'єзоелектричних елементів з частково електродованими поверхнями, розглянемо першу обчислювальну процедуру, тобто розрахунок просторового розподілу в об'ємі п'єзоелектричного елемента



змінного електричного поля. Вирішення цього завдання дозволяє виконати оцінку кількості енергії, яка споживається п'єзоелектричним елементом від зовнішнього джерела, тобто від генератора електричних сигналів. Ця процедура є першим етапом енергосилового методу [5, 6] аналізу фізичного стану п'єзоелектричних елементів в режимі вимушених коливань під дією зовнішнього джерела електричної енергії.

Отже, метою даної роботи є побудова схеми розрахунку дискового п'єзоелектричного елемента з частковим електродуванням поверхні.

### Основна частина

#### Розрахунок змінного електричного поля в об'ємі дискового п'єзоелектричного елемента з частково електродуваннями поверхнями

Розглянемо диск (рис. 1) з поляризованої по товщині п'єзоелектричної кераміки типу ЦТС (PZT). Електрод на верхній ( $z = \alpha$ ) поверхні п'єзокерамічного диска (позиція 1 на рис. 1) має форму кола радіуса  $R_0$  з центром на вісі  $Oz$  циліндричної системи координат. На цей електрод подається гармонійно змінний в часі за законом  $e^{i\omega t}$  ( $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – кругова частота;  $t$  – час) електричний потенціал  $U(t) = U_0 e^{i\omega t}$ . Електрод на нижній ( $z = 0$ ) поверхні диска (позиція 2 на рис. 1) виконаний у формі кільця з центром на вісі  $Oz$ . Кільцевий електрод заземлений, тобто його потенціал завжди дорівнює нулю.

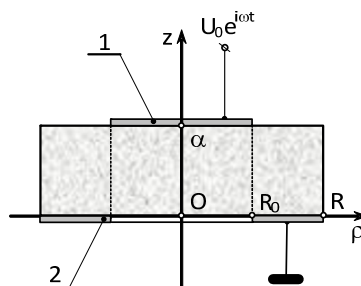


Рис. 1. П'єзоелектричний диск з частковим електродуванням поверхонь

Дослідимо характер розподілу змінного електричного поля в об'ємі п'єзокерамічного диска в припущенні, що зовнішній радіус  $R_0$  верхнього електрода збігається з внутрішнім радіусом нижнього.

В роботі [4] показано, що змінне електричне поле в об'ємі п'єзоелектричного диска визначається за допомогою скалярного потенціалу  $\Phi^*(\rho, \varphi, z) e^{i\omega t}$ . При співвісному розташуванні верхнього і нижнього електродів амплітудне значення скалярного потенціалу залежить тільки від радіальної  $\rho$  і аксіальної  $z$  координати циліндричної системи координат. Говорячи іншими словами, показана на рис. 1 електродна структура створює в об'ємі диска з поляризованої по товщині п'єзокераміки вісесиметричне змінне електричне поле, скалярний потенціал якого визначається рівнянням Лапласа такого вигляду

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[ \rho \frac{\partial \Phi^*(\rho, z)}{\partial \rho} \right] + \xi^2 \frac{\partial^2 \Phi^*(\rho, z)}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

де  $\xi^2 = \chi_{33}^e / \chi_{11}^e$  – квадрат коефіцієнта анізотропії діелектричної проникності поляризованої кераміки;  $\chi_{33}^e$  – компонент тензора діелектричної проникності в напрямку електричної поляризації;  $\chi_{11}^e$  – компонент тензора діелектричної проникності в будь-якому напрямку на площині, яка перпендикулярна напрямку електричної поляризації матеріалу диска.

Для спрощення подальших обчислень розіб'ємо об'єм п'єзокерамічного диску на дві області. Першу область ( $0 \leq \rho \leq R_0$ ;  $0 \leq z \leq \alpha$ ) будемо називати внутрішньої і електричний потенціал в її межах будемо позначати символом  $\Phi_{(1)}^*(\rho, z)$ . Кільцеву область ( $R_0 \leq \rho \leq R$ ;  $0 \leq z \leq \alpha$ ) будемо називати зовнішньою областю або другою областю, а електричний потенціал в межах цієї області будемо позначати символом  $\Phi_{(2)}^*(\rho, z)$ .

На зовнішніх і внутрішніх поверхнях внутрішньої і зовнішньої областей потенціали  $\Phi_{(1)}^*(\rho, z)$  і  $\Phi_{(2)}^*(\rho, z)$  повинні відповідати наступним граничним умовам:

$$\Phi_{(1)}^*(\rho, \alpha) = U_0 \forall \rho \in [0, R_0], \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_{(1)}^*(\rho, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \forall \rho \in [0, R_0], \quad (3)$$



$$\Phi_{(1)}^*(R_0, z) - \Phi_{(2)}^*(R_0, z) = 0 \forall z \in [0, \alpha], \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi_{(1)}^*(R_0, z)}{\partial z} - \frac{\partial \Phi_{(2)}^*(R_0, z)}{\partial z} = 0 \forall z \in [0, \alpha], \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_{(1)}^*(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} - \left. \frac{\partial \Phi_{(2)}^*(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = 0 \forall z \in [0, \alpha], \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_{(2)}^*(\rho, z)}{\partial z} \right|_{z=\alpha} = 0 \forall \rho \in [R_0, R], \quad (7)$$

$$\Phi_{(2)}^*(\rho, 0) = 0 \forall \rho \in [R_0, R], \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_{(2)}^*(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R} = 0 \forall z \in [0, \alpha]. \quad (9)$$

Умови (3), (7) і (9) є наближеними [7] і виконуються тим точніше, чим більше діелектричні проникності  $\chi_{33}^e$  і  $\chi_{11}^e$  відрізняються від діелектричної проникності вакууму  $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Оскільки діелектричні проникності  $\chi_{33}^e$  і  $\chi_{11}^e$  більш ніж на три порядки перевершують діелектричну проникність навколишнього для п'єзокерамічного диску середовища, остільки ці граничні умови можна розглядати як практично точні. Умови (4) – (6) мають сенс умов зшивання рішень рівняння (1) на межі  $\rho = R_0$  внутрішньої і зовнішньої областей.

Рішення рівняння (1) як по зовнішній, так і по внутрішній областях, будемо шукати за стандартною технологією розділення змінних [8], тобто будемо вважати, що

$$\Phi_{(k)}^*(\rho, z) = R^{(k)}(\rho)Z^{(k)}(z), \quad k = 1, 2, \quad (10)$$

де  $R^{(k)}(\rho)$  і  $Z^{(k)}(z)$  – функції, що залежать тільки від радіальної і аксіальної координати відповідно.

Підставляючи передбачуваний вид рішення (10) в рівняння (1), отримуємо можливість записати його в наступному вигляді

$$\frac{1}{R^{(k)}(\rho)} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial R^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 R^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} \right] = - \frac{\xi^2}{Z^{(k)}(z)} \frac{\partial^2 Z^{(k)}(z)}{\partial z^2}. \quad (11)$$

Рівність (11) може виконуватися при довільних значеннях змінних  $\rho$  і  $z$  тільки в одному випадку, коли його ліва і права частини не залежать від  $\rho$  і  $z$  відповідно, і обидві рівні одній і тій же константі, яка називається константою розділення [8]. Вибір константи розділення в значній мірі зумовлюється фізичним змістом розв'язуваної задачі. Позначимо, для зручності подальших записів константу розділення символом  $\beta^2$ . При цьому з рівняння (11) слідує два звичайних диференціальних рівнянь такого вигляду:

$$\frac{1}{R^{(k)}(\rho)} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial R^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 R^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} \right] = \beta^2, \quad (12)$$

$$- \frac{\xi^2}{Z^{(k)}(z)} \frac{\partial^2 Z^{(k)}(z)}{\partial z^2} = \beta^2. \quad (13)$$

Велика кількість граничних умов (див. співвідношення (2) – (9)) вимагає відповідного набору констант в загальних рішеннях  $\Phi_{(k)}^*(\rho, z)$ . Забезпечити відповідну кількість констант можна наступним чином.

Розглянемо внутрішню область ( $k = 1$ ).

Якщо в рівняннях (12) і (13) визначити параметр  $\beta$  як дійсне число  $\beta_1$ , то отримуємо такий вираз для скалярного потенціалу

$$\Phi_{(11)}^*(\rho, z) = I_0(\beta_1 \rho) [A_1 \cos(\lambda_1 z) + B_1 \sin(\lambda_1 z)], \quad (14)$$

де  $I_0(\beta_1 \rho)$  – модифікована функція Бесселя нульового порядку;  $A_1$  і  $B_1$  – константи;  $\lambda_1 = \beta_1 / \xi$ ;  $\beta_1$  – дійсне число, яке підлягає визначенню.

Припустимо тепер, що параметр  $\beta$  є уявним числом  $i\beta_2$ , тобто  $\beta^2 = -\beta_2^2$ . Тоді з рівнянь (12) і (13) отримуємо наступний вираз для розрахунку скалярного потенціалу внутрішньої області дискового п'єзоелемента

$$\Phi_{(12)}^*(\rho, z) = J_0(\beta_2 \rho) [A_2 \operatorname{ch}(\lambda_2 z) + B_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 z)], \quad (15)$$

де  $J_0(\beta_2 \rho)$  – функція Бесселя нульового порядку;  $A_2$  і  $B_2$  – константи;  $\lambda_2 = \beta_2 / \xi$ ;  $\beta_2$  – число, яке

підлягає визначенню. Очевидно, що суперпозиція загальних рішень  $\Phi_{(11)}^*(\rho, z)$  і  $\Phi_{(12)}^*(\rho, z)$  також є загальним розв'язком рівняння (1), тобто

$$\Phi_{(1)}^*(\rho, z) = \Phi_{(11)}^*(\rho, z) + \Phi_{(12)}^*(\rho, z). \tag{16}$$

З граничної умови (3) випливає, що

$$\lambda_1 I_0(\beta_1 \rho) B_1 + \lambda_2 J_0(\beta_2 \rho) B_2 = 0 \quad \forall \rho \in [0, R_0]. \tag{17}$$

Якщо покласти константи  $B_1 = B_2 = 0$ , то рівність (17) і, відповідно, гранична умова (3), будуть виконуватися автоматично.

Оскільки числа  $\beta_1$  і  $\beta_2$  можуть призначатися довільно розрахувачем, остільки їх визначимо так, щоб виконувалися наступні умови:

$$\cos(\lambda_1 \alpha) = 0, \tag{18}$$

$$J_0(\beta_2 R_0) = 0. \tag{19}$$

З умов (18) і (19) випливає, що

$$\beta_1 = \beta_n = \frac{\pi}{2\alpha}(1 + 2n)\xi, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \tag{20}$$

$$\beta_2 = q_m / R_0, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \tag{21}$$

де  $q_m$  –  $m$ -ий корінь рівняння  $J_0(x) = 0$ . Перші п'ять коренів цього рівняння мають такі числові значення:  $q_1 = 2,404826$ ,  $q_2 = 5,520078$ ,  $q_3 = 8,653728$ ,  $q_4 = 11,791534$  і  $q_5 = 14,930918$ . Легко помітити, що  $q_m - q_{m-1} \approx \pi$ , при цьому наближена рівність виконується тим точніше, чим більше  $m$  номер кореня.

Так як власні числа  $\beta_k$  і  $\lambda_k$  ( $k = 1, 2$ ) утворюють нескінченні множини, то їм повинні відповідати нескінченні множини констант  $A_{1n}$  і  $A_{2m}$ . При цьому вираз для розрахунку скалярного потенціалу  $\Phi_{(1)}^*(\rho, z)$  приймає наступний вигляд

$$\Phi_{(1)}^*(\rho, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{1n} I_0(\beta_n \rho) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1 + 2n)\right] + \sum_{m=1}^{\infty} A_{2m} J_0\left(\frac{q_m \rho}{R_0}\right) ch(\lambda_m z), \tag{22}$$

де  $\lambda_m = q_m / (\xi R_0)$ .

При  $z = \alpha$  повинно виконуватися гранична умова (3). Підставляючи  $z = \alpha$  в розрахункову формулу (22), отримуємо

$$\sum_{m=1}^{\infty} A_{2m} J_0\left(\frac{q_m \rho}{R_0}\right) ch(\lambda_m \alpha) = U_0. \tag{23}$$

Функції Бесселя  $J_0(q_m \rho / R_0)$  на інтервалі  $0 \leq \rho \leq R_0$  утворюють систему ортогональних функцій, тобто існує інтеграл [9] наступного вигляду

$$\int_0^{R_0} \rho J_0(q_m \rho / R_0) J_0(q_p \rho / R_0) d\rho = \begin{cases} 0 \quad \forall m \neq p, \\ R_0^2 J_1^2(q_m) / 2 \quad \text{при } m = p, \end{cases} \tag{24}$$

де  $J_1(q_m)$  – функція Бесселя першого порядку. Використовуючи властивість ортогональності (24), з рівняння (23) отримуємо наступні значення коефіцієнтів  $A_{2m}$ :

$$A_{2m} = U_0 \tilde{A}_{2m}(q_m), \tag{25}$$

де безрозмірний множник  $\tilde{A}_{2m}(q_m)$  визначається наступним виразом

$$\tilde{A}_{2m}(q_m) = \frac{2}{q_m J_1(q_m) ch\left(\frac{q_m \alpha}{\xi R_0}\right)}. \tag{26}$$

У таблиці 1 наведені результати розрахунків безрозмірних вагових множників  $\tilde{A}_{2m}(q_m)$  для перших десяти коренів рівняння  $J_0(x) = 0$ . При виконанні обчислень коефіцієнт анізотропії  $\xi = \sqrt{\chi_{33}^e / \chi_{11}^e}$  діелектричної проникності поляризованої п'єзокераміки дорівнює одиниці, тобто прийнято, що  $\chi_{33}^e / \chi_{11}^e = 1$ . Насправді для п'єзокераміки типу ЦТС 19 коефіцієнт  $\xi = 0,97 \div 0,99$ . У третій колонці табл. 1 наведені значення вагового коефіцієнта  $\tilde{A}_{2m}^0 = 1 / [q_m J_1(q_m)]$ , що не залежать від геометричного параметра  $\alpha / R_0$ . Безрозмірний ваговий множник  $\tilde{A}_{2m}(q_m)$  розраховувався при різних значеннях параметра  $\alpha / R_0$ , що зазначено в заголовках відповідних колонок табл. 1.

Отже, скалярний потенціал  $\Phi_{(1)}^*(\rho, z)$  у внутрішній області  $0 \leq \rho \leq R_0$  дискового п'єзоелектричного елемента визначається наступним виразом

$$\Phi_{(1)}^*(\rho, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n I_0 \left[ \frac{\pi \rho}{2\alpha} (1+2n) \xi \right] \cos \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1+2n) \right] + U_0 \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{A}_{2m}(q_m) J_0 \left( \frac{q_m \rho}{R_0} \right) ch \left( \frac{q_m z}{\xi R_0} \right). \quad (27)$$

Таблиця 1

Числові значення безрозмірних вагових множників  $\tilde{A}_{2m}(q_m)$  для перших десяти коренів  $q_m$  рівняння  $J_0(x) = 0$

m	q <sub>m</sub>	A <sub>2m</sub> <sup>0</sup>	A <sub>2m</sub> (q <sub>m</sub> )			
			α/R <sub>0</sub> =	α/R <sub>0</sub> =	α/R <sub>0</sub> =	α/R <sub>0</sub> =
1	2,404826(00)	1,601975(00)	1,556743(00)	1,433008(00)	1,068376(00)	4,581400(-01)
2	5,520078(00)	-1,064799(00)	-9,208959(-01)	-6,361205(-01)	-2,312844(-01)	-2,572544(-02)
3	8,653728(00)	8,513992(-01)	6,088411(-01)	2,924759(-01)	5,338622(-02)	1,677065(-03)
4	1,179153(01)	-7,296452(-01)	-4,100099(-01)	-1,367963(-01)	-1,305292(-02)	-1,167732(-04)
5	1,493092(01)	6,485236(-01)	2,774129(-01)	6,530816(-02)	3,305117(-03)	8,422161(-06)
6	1,807106(01)	-5,895428(-01)	-1,884451(-01)	-3,173932(-02)	-8,556177(-04)	-6,208900(-07)
7	2,121164(01)	5,441802(-01)	1,286367(-01)	1,564097(-02)	2,248713(-04)	4,646171(-08)
8	2,435247(01)	-5,078936(-01)	-8,828160(-02)	-7,790196(-03)	-5,975099(-05)	-3,514693(-09)
9	2,749348(01)	4,780125(-01)	6,090726(-02)	3,912089(-03)	1,600895(-05)	2,680750(-10)
10	3,063461(01)	-4,528506(-01)	-4,222733(-02)	-1,977401(-03)	-4,317264(-06)	-2,057938(-11)

Примітка. Запис 1,856312(-05) еквівалентна запису  $1,856312 \times 10^{-5}$ .

Загальні рішення рівнянь (12), (13) для зовнішньої області  $R_0 \leq \rho \leq R$  дискового п'єзоелектричного елемента записуються в наступному вигляді:

а) константа розділення – дійсне число  $\beta_1$ :

$$R_{(1)}^{(2)}(\rho) = C_1 I_0(\beta_1 \rho) + D_1 K_0(\beta_1 \rho), \quad (28)$$

$$Z_{(1)}^{(2)}(z) = E_1 \cos(\lambda_1 z) + F_1 \sin(\lambda_1 z), \quad (29)$$

б) константа розділення – уявне число  $i\beta_2$ :

$$R_{(2)}^{(2)}(\rho) = C_2 J_0(\beta_2 \rho) + D_2 N_0(\beta_2 \rho), \quad (30)$$

$$Z_{(2)}^{(2)}(z) = E_2 ch(\lambda_2 z) + F_2 sh(\lambda_2 z), \quad (31)$$

де  $C_k, D_k, E_k$  і  $F_k$  ( $k=1,2$ ) – константи;  $K_0(\beta_1 \rho)$  – функція Макдональда нульового порядку;  $N_0(\beta_2 \rho)$  – функція Неймана нульового порядку.

Для того, щоб скалярний потенціал  $\Phi_{(2)}^*(\rho, z)$  задовольняв умові (9) необхідно і достатньо, щоб функції  $R_{(k)}^{(2)}(\rho)$  ( $k=1,2$ ) задовольняли умові такого вигляду

$$\left. \frac{\partial R_{(k)}^{(2)}(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R} = 0. \quad (32)$$

Умова (32) еквівалентна наступним двом рівностям:

$$\beta_1 [C_1 I_1(\beta_1 R) - D_1 K_1(\beta_1 R)] = 0,$$

$$-\beta_2 [C_2 J_1(\beta_2 R) + D_2 N_1(\beta_2 R)] = 0,$$

де  $K_1(\beta_1 R)$  і  $N_1(\beta_2 R)$  – функції Макдональда і Неймана першого порядку. З останніх рівностей випливає, що

$$D_1 = C_1 \frac{I_1(\beta_1 R)}{K_1(\beta_1 R)}, \quad D_2 = -C_2 \frac{J_1(\beta_2 R)}{N_1(\beta_2 R)}. \quad (33)$$

При цьому скалярний потенціал  $\Phi_{(2)}^*(\rho, z)$  буде визначатися наступним чином

$$\Phi_{(2)}^*(\rho, z) = \Phi_{(21)}^*(\rho, z) + \Phi_{(22)}^*(\rho, z), \quad (34)$$

де

$$\Phi_{(21)}^*(\rho, z) = \left[ I_0(\beta_1 \rho) + \frac{I_1(\beta_1 R)}{K_1(\beta_1 R)} K_0(\beta_1 \rho) \right] \times [E \cos(\lambda_1 z) + F \sin(\lambda_1 z)], \quad (35)$$

$$\Phi_{(22)}^*(\rho, z) = \left[ J_0(\beta_2 \rho) - \frac{J_1(\beta_2 R)}{N_1(\beta_2 R)} N_0(\beta_2 \rho) \right] \times [M \operatorname{ch}(\lambda_2 z) + N \operatorname{sh}(\lambda_2 z)]; \quad (36)$$

$$E = E_1 C_1; F = F_1 C_1; M = E_2 C_2 \text{ і } N = F_2 C_2.$$

З метою спрощення подальших викладок, визначимо константи розділення  $\beta_1$  і  $\beta_2$  наступним чином:

$$\beta_1 = \beta_\ell = \frac{\pi}{2\alpha} (1 + 2\ell) \xi, \quad \ell = 0, 1, 2, \dots, \quad (37)$$

$$\beta_2 = \beta_p = \zeta_p / R_0, \quad p = 1, 2, 3, \dots, \quad (38)$$

де  $\zeta_p$  – корінь номера  $p$  трансцендентного рівняння

$$J_0(x) N_1(kx) - J_1(kx) N_0(x) = 0, \quad (39)$$

де  $k = R/R_0$  – геометричний параметр дискового п'єзоелектричного елемента.

У таблиці 2 наведені числові значення перших десяти коренів трансцендентного рівняння (39), які розраховувалися при значеннях співвідношення  $R_0/R = 0,8; 0,6; 0,4$  і  $0,2$ , чому відповідають значення  $k = 1,25; 1,67; 2,5$  і  $5$ . Легко помітити, що числові значення коренів необмежено зростають при  $k \rightarrow 1$ .

Таблиця 2

Перші десять коренів трансцендентного рівняння  $J_0(x) N_1(kx) - J_1(kx) N_0(x) = 0$

$p$	$\zeta_p$			
	$k = 1,25$	$k = 1,6(6)$	$k = 2,50$	$k = 5,00$
1	1,875902(01)	2,120370(00)	8,660582(-01)	2,823584(-01)
2	3,136174(01)	6,993940(00)	3,083539(00)	1,139215(00)
3	4,394362(01)	1,173633(01)	5,201067(00)	1,939183(00)
4	5,651859(01)	1,646150(01)	7,305411(00)	2,731207(00)
5	6,909044(01)	2,118098(01)	9,405344(00)	3,520405(00)
6	8,166059(01)	2,589788(01)	1,150327(01)	4,308266(00)
7	9,422974(01)	3,061338(01)	1,360011(01)	5,095389(00)
8	1,067982(02)	3,532806(01)	1,569630(01)	5,882061(00)
9	1,193663(02)	4,004220(01)	1,779206(01)	6,668439(00)
10	1,319340(02)	4,475597(01)	1,988754(01)	7,454613(00)

Множинам констант розділення відповідають еквівалентні за потужністю множини констант  $E_\ell$ ,  $F_\ell$ ,  $M_p$  і  $N_p$ . При цьому вирази (35) і (36) записуються в наступному вигляді:

$$\Phi_{(21)}^*(\rho, z) = \sum_{\ell=0}^{\infty} W_0(\beta_\ell \rho) \left\{ E_\ell \cos \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1 + 2\ell) \right] + F_\ell \sin \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1 + 2\ell) \right] \right\}, \quad (40)$$

$$\Phi_{(22)}^*(\rho, z) = \sum_{p=1}^{\infty} \Omega_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right) \left[ M_p \operatorname{ch} \left( \frac{\zeta_p z}{\xi R_0} \right) + N_p \operatorname{sh} \left( \frac{\zeta_p z}{\xi R_0} \right) \right], \quad (41)$$

де  $W_0(\beta_\ell \rho) = I_0(\beta_\ell \rho) + \frac{I_1(\beta_\ell R)}{K_1(\beta_\ell R)} K_0(\beta_\ell \rho)$ ;  $\Omega_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right) = J_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right) - \frac{J_1(k \zeta_p)}{N_1(k \zeta_p)} N_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right)$ ;  $k = \frac{R}{R_0}$ .

Вирази (27), (40) і (41) містять п'ять наборів констант ( $A_n, E_\ell, F_\ell, M_p$  і  $N_p$ ), і повинні відповідати умовам зшивання рішень (4), (5) і (6) на межі  $\rho = R_0$  розділу внутрішньої і зовнішньої областей і умовам (7) і (8) на верхній і нижній межі зовнішньої області дискового п'єзоелектричного елемента. Конструкція вирізів (27), (40) і (41) забезпечує автоматичне виконання граничних умов (2), (3) і (9).

Випишемо умови (4) – (8) в явному вигляді.

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n I_0(\beta_n R_0) \cos \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1 + 2n) \right] = \sum_{\ell=0}^{\infty} W_0(\beta_\ell R_0) \left\{ E_\ell \cos \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1 + 2\ell) \right] + F_\ell \sin \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1 + 2\ell) \right] \right\}, \quad (42)$$

$$-\frac{\pi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) A_n I_0(\beta_n R_0) \sin \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1+2n) \right] = \frac{\pi}{2\alpha} \sum_{\ell=0}^{\infty} (1+2\ell) W_0(\beta_\ell R_0) \left\{ -E_\ell \sin \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1+2\ell) \right] + F_\ell \cos \left[ \frac{\pi z}{2\alpha} (1+2\ell) \right] \right\}, \quad (43)$$

$$\frac{\pi\xi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) A_n I_1(\beta_n R_0) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] - \frac{2U_0}{R_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{ch[q_m z/(\xi R_0)]}{ch[q_m \alpha/(\xi R_0)]} =$$

$$= \frac{\pi\xi}{2\alpha} \sum_{\ell=0}^{\infty} (1+2\ell) W_1(\beta_\ell R_0) \left\{ E_\ell \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2\ell)\right] + F_\ell \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2\ell)\right] \right\} - \frac{1}{R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_1(\zeta_p) \left[ M_p ch\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) + N_p sh\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) \right], \quad (44)$$

$$\frac{\pi}{2\alpha} \sum_{\ell=0}^{\infty} (1+2\ell) W_0(\beta_\ell \rho) E_\ell + \frac{1}{\xi R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) \left[ M_p sh\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) + N_p ch\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) \right] = 0, \quad (45)$$

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} W_0(\beta_\ell \rho) E_\ell + \sum_{p=1}^{\infty} \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) M_p = 0, \quad (46)$$

де  $W_0(\beta_\ell R_0) = I_0(\beta_\ell R_0) + \frac{I_1(\beta_\ell R)}{K_1(\beta_\ell R)} K_0(\beta_\ell R_0)$ ;  $W_1(\beta_\ell R_0) = I_1(\beta_\ell R_0) - \frac{I_1(\beta_\ell R)}{K_1(\beta_\ell R)} K_1(\beta_\ell R_0)$ ;

$$\Omega_1(\zeta_p) = J_1(\zeta_p) - \frac{J_1(k\zeta_p)}{N_1(k\zeta_p)} N_1(\zeta_p).$$

У неоднорідній системі з п'яти алгебраїчних рівнянь (42) – (46) міститься п'ять наборів невідомих констант, тобто величин  $A_n, E_\ell, F_\ell, M_p$  і  $N_p$ . Це, в принципі, забезпечує єдність розв'язку системи алгебраїчних рівнянь (42) – (46).

Так як тригонометричні функції  $\cos[\pi z(1+2n)/(2\alpha)]$  і  $\sin[\pi z(1+2n)/(2\alpha)]$  на інтервалі  $0 \leq z \leq \alpha$  утворюють систему ортогональних функцій, тобто існують інтеграли

$$\int_0^\alpha \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2k)\right] \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = \begin{cases} 0 \quad \forall k \neq n, \\ \alpha/2 \quad \text{при } k = n, \end{cases}$$

$$\int_0^\alpha \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2k)\right] \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = \begin{cases} 0 \quad \forall k \neq n, \\ \alpha/2 \quad \text{при } k = n, \end{cases}$$

то рівняння (42) і (43) без особливих зусиль приводяться до наступного вигляду

$$\frac{\alpha}{2} A_n I_0\left[\frac{\pi R_0}{2\alpha}(1+2n)\xi\right] = \frac{\alpha}{2} W_0(\beta_n R_0) E_n + \frac{\alpha}{2\pi} \sum_{\ell=0}^{\infty} W_0(\beta_\ell R_0) I_{\ell n}^{sc} F_\ell, \quad (47)$$

$$-\frac{\pi}{4}(1+2n) A_n I_0\left[\frac{\pi R_0}{2\alpha}(1+2n)\xi\right] = -\frac{\pi}{4}(1+2n) W_0(\beta_n R_0) E_n + \frac{1}{4} \sum_{\ell=0}^{\infty} (1+2\ell) W_0(\beta_\ell R_0) I_{\ell n}^{cs} F_\ell, \quad (48)$$

де 
$$I_{\ell n}^{sc} = \frac{2\pi}{\alpha} \int_0^\alpha \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2\ell)\right] \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = I_{\ell n}^{cs} = \frac{2\pi}{\alpha} \int_0^\alpha \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2\ell)\right] \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz =$$

$$= \frac{(-1)^{\ell-n}(1+2\ell) - (1+2n)}{(1+\ell+n)(\ell-n)} \quad \forall n \neq \ell;$$

$$I_{\ell n}^{sc} = I_{\ell n}^{cs} = \frac{2\pi}{\alpha} \int_0^\alpha \sin\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = \frac{2}{1+2n}.$$

З рівностей (47) і (48) випливає, що

$$A_n = \frac{W_0(\beta_n R_0)}{I_0(\beta_n R_0)} E_n, \quad F_\ell = 0. \quad (49)$$

З огляду на отримані результати, рівняння (44) – (46) доцільно записати в наступному вигляді

$$\frac{\pi\xi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} Q_n(\beta_n R_0) E_n \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] + \frac{1}{R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_1(\zeta_p) \left[ M_p ch\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) + N_p sh\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) \right] = \frac{2U_0}{R_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{ch[q_m z/(\xi R_0)]}{ch[q_m \alpha/(\xi R_0)]}, \quad (50)$$

$$\frac{\pi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) W_0(\beta_n \rho) E_n + \frac{1}{\xi R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) \left[ M_p sh\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) + N_p ch\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) \right] = 0, \quad (51)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} W_0(\beta_n \rho) E_n + \sum_{p=1}^{\infty} \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) M_p = 0, \quad (52)$$

де  $Q_n(\beta_n R_0) = (1+2n) \left[ \frac{I_1(\beta_n R_0)}{I_0(\beta_n R_0)} W_0(\beta_n R_0) - W_1(\beta_n R_0) \right] = \frac{2\alpha}{\pi R_0 \xi} \frac{I_1(\beta_n R)}{I_0(\beta_n R_0) K_1(\beta_n R)}$ .

Система рівнянь (50) – (52) точного рішення не має. Разом з тим можна побудувати обчислювальну процедуру, яка дозволяє отримати досить хороші наближення до точного розв'язання зазначеної системи

алгебраїчних рівнянь. В обчислювальній математиці ця процедура називається методом послідовних наближень [10]. При цьому шукані константи  $E_n$ ,  $M_p$  і  $N_p$  представляються наступними рядами:

$$E_n = E_n^{(0)} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \Delta E_n^{(\nu)}, M_p = M_p^{(0)} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \Delta M_p^{(\nu)}, N_p = N_p^{(0)} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \Delta N_p^{(\nu)}, \quad (53)$$

де  $E_n$ ,  $M_p$  і  $N_p$  – точні рішення системи рівнянь (50) – (52);  $E_n^{(0)}$ ,  $M_p^{(0)}$  і  $N_p^{(0)}$  нульові, тобто найгрубіші, наближення до точних рішень системи рівнянь (50) – (52);  $\Delta E_n^{(\nu)}$ ,  $\Delta M_p^{(\nu)}$  і  $\Delta N_p^{(\nu)}$  – поправки порядку  $\nu$  до наближення  $\nu - 1$  порядку до точних рішень системи рівнянь (50)–(52).

Найбільш грубі, тобто нульові наближення, до точних значень констант  $E_n$ ,  $M_p$  і  $N_p$ , будемо шукати з видозміненої системи рівнянь (50) – (52), яка записується наступним чином:

$$\frac{\pi \xi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} Q_n(\beta_n R_0) E_n^{(0)} \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] = \frac{2U_0}{R_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{ch[q_m z / (\xi R_0)]}{ch[q_m \alpha / (\xi R_0)]}, \quad (54)$$

$$\frac{\pi}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) W_0(\beta_n \rho) E_n^{(0)} + \frac{1}{\xi R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) \left[ M_p^{(0)} sh\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) + N_p^{(0)} ch\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) \right] = 0, \quad (55)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} W_0(\beta_n \rho) E_n^{(0)} + \sum_{p=1}^{\infty} \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) M_p^{(0)} = 0. \quad (56)$$

Використовуючи властивість ортогональності тригонометричних функцій  $\cos[\pi z(1+2n)/(2\alpha)]$  на інтервалі  $0 \leq z \leq \alpha$ , рівняння (54) можна без особливих зусиль привести до наступного вигляду

$$\frac{\pi \xi}{4} Q_n(\beta_n R_0) E_n^{(0)} = \frac{2U_0}{R_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_{mn}}{ch[q_m \alpha / (\xi R_0)]},$$

де  $J_{mn} = \int_0^{\alpha} ch\left(\frac{q_m z}{\xi R_0}\right) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = -\xi R_0 \pi \left(\frac{\xi R_0}{2\alpha}\right) \frac{(1+2n)}{\left\{q_m^2 + \left[\frac{\pi(1+2n)\xi R_0}{2\alpha}\right]^2\right\}} ch\left(\frac{q_m \alpha}{\xi R_0}\right).$

З останньої рівності випливає, що

$$E_n^{(0)} = -\frac{4R_0 \xi}{\alpha} U_0 e_n(\beta_n R_0), \quad (57)$$

де  $e_n(\beta_n R_0) = \frac{1}{Q_n(\beta_n R_0)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(1+2n)}{\left[q_m^2 + \left(\frac{\pi \xi R_0}{2\alpha}\right)^2 (1+2n)^2\right]}.$

Функція  $\Omega_0(\zeta_p \rho / R_0)$ , що входить до складу рівнянь (55) і (56), на інтервалі  $R_0 \leq \rho \leq R$  утворює систему ортогональних функцій, тобто існує інтеграл такого вигляду

$$B_{pq} = \int_{R_0}^R \rho \Omega_0\left(\frac{\zeta_p \rho}{R_0}\right) \Omega_0\left(\frac{\zeta_q \rho}{R_0}\right) d\rho = \begin{cases} 0 \quad \forall p \neq q, \\ B_0 \quad \text{при } p=q. \end{cases} \quad (58)$$

Прямими обчисленнями можна показати, що

$$B_0 = \frac{2R_0^2}{\pi^2} \Xi_p(k, \zeta_p), \quad (59)$$

де  $\Xi_p(k, \zeta_p) = \frac{1}{\zeta_p^2} + \frac{\pi^2}{2} \frac{J_1(k \zeta_p)}{N_1(k \zeta_p)} \times \{J_0(\zeta_p) N_0(\zeta_p) + J_1(\zeta_p) N_1(\zeta_p) - k^2 [J_0(k \zeta_p) N_0(k \zeta_p) + J_1(k \zeta_p) N_1(k \zeta_p)]\};$

$k = R/R_0$  – геометричний параметр п'єзоелектричного диску з частковим електродуванням поверхні.

Використовуючи ортогональність функцій  $\Omega_0(\zeta_p \rho / R_0)$ , тобто властивості інтеграла (58), рівняння (55) і (56) приводяться до наступного вигляду:

$$-U_0 \frac{\xi R_0 \pi}{\alpha^2} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) \frac{Q_{np}(\beta_n, \zeta_p)}{\left[\zeta_p^2 + (\beta_n R_0)^2\right]} e_n(\beta_n R_0) + \frac{\zeta_p}{\xi R_0 \pi^2} \Xi_p(k, \zeta_p) \left[ M_p^{(0)} sh\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) + N_p^{(0)} ch\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) \right] = 0, \quad (60)$$

$$-U_0 \frac{2\xi R_0 \pi^2}{\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_{np}(\beta_n, \zeta_p)}{\left[\zeta_p^2 + (\beta_n R_0)^2\right]} e_n(\beta_n R_0) + \Xi_p(k, \zeta_p) M_p^{(0)} = 0, \quad (61)$$

$$\text{де } Q_p(\beta_n, \zeta_p) = -\zeta_p N_1(\zeta_p) \left\{ \left[ I_0(\beta_n R_0) + \frac{I_1(\beta_n R)}{K_1(\beta_n R)} K_0(\beta_n R_0) \right] \frac{J_1(\zeta_p)}{N_1(\zeta_p)} - \left[ I_0(\beta_n R_0) + \frac{I_1(\beta_n R)}{K_1(\beta_n R)} K_0(\beta_n R_0) \right] \frac{J_1(k\zeta_p)}{N_1(k\zeta_p)} \right\}.$$

З рівняння (61) випливає, що

$$M_p^{(0)} = U_0 \frac{2\xi R_0 \pi^2}{\alpha} m_p^{(0)}(k, \zeta_p), \quad (62)$$

$$\text{де } m_p^{(0)}(k, \zeta_p) = \frac{1}{\Xi_p(k, \zeta_p)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_{np}(\beta_n, \zeta_p)}{[\zeta_p^2 + (\beta_n R_0)^2]} e_n(\beta_n R_0).$$

Підставляючи визначене формулою (62) нульове наближення до точного значення константи  $M_p$  в рівняння (60), знаходимо величину  $N_p^{(0)}$ :

$$N_p^{(0)} = U_0 \frac{R_0}{\alpha} n_p^{(0)}(k, \zeta_p), \quad (63)$$

$$\text{де } n_p^{(0)}(k, \zeta_p) = \frac{\xi^2 R_0 \pi^3}{\zeta_p \alpha \operatorname{ch}[\zeta_p \alpha / (\xi R_0)] \Xi_p(k, \zeta_p)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_{np}(\beta_n, \zeta_p)}{[\zeta_p^2 + (\beta_n R_0)^2]} e_n(\beta_n R_0) - 2\xi \pi^2 m_p^{(0)}(k, \zeta_p) \operatorname{th}\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right).$$

Для визначення поправки  $\Delta E_n^{(1)}$  підставимо в рівняння (50) наближені значення коефіцієнтів  $E_n \approx E_n^{(0)} + \Delta E_n^{(1)}$ ,  $M_p \approx M_p^{(0)}$  і  $N_p \approx N_p^{(0)}$ . Після цього, беручи до уваги рівняння (54), отримуємо наступний результат

$$\frac{\xi \pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \Delta E_n^{(1)} Q_n(\beta_n R_0) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] + U_0 \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_1(\zeta_p) \left[ 2\xi \pi^2 m_p^{(0)}(k, \zeta_p) \operatorname{ch}\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) + n_p^{(0)}(k, \zeta_p) \operatorname{sh}\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) \right] = 0. \quad (64)$$

Використовуючи ортогональність функцій  $\cos[\pi z(1+2n)/(2\alpha)]$  на інтервалі  $0 \leq z \leq \alpha$ , можна привести рівняння (64) до наступного вигляду

$$\frac{\xi \pi}{4} \Delta E_n^{(1)} Q_n(\beta_n R_0) = -2U_0 \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_1(\zeta_p) \left[ -2\xi \pi^2 m_p^{(0)}(k, \zeta_p) I_1^*(p, n) + n_p^{(0)}(k, \zeta_p) I_2^*(p, n) \right], \quad (65)$$

$$\text{де } I_1^*(p, n) = -\frac{1}{2\alpha} \int_0^\alpha \operatorname{ch}\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = \frac{\pi(1+2n)}{\left(\frac{2\xi \alpha}{\xi R_0}\right)^2 + [\pi(1+2n)]^2} \operatorname{ch}\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right);$$

$$I_2^*(p, n) = \frac{1}{2\alpha} \int_0^\alpha \operatorname{sh}\left(\frac{\zeta_p z}{\xi R_0}\right) \cos\left[\frac{\pi z}{2\alpha}(1+2n)\right] dz = \frac{1}{\left(\frac{2\xi \alpha}{\xi R_0}\right)^2 + [\pi(1+2n)]^2} \left[ \frac{2\xi \alpha}{\xi R_0} - \pi(1+2n) \operatorname{sh}\left(\frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0}\right) \right].$$

З рівності (65) випливає вираз для розрахунку поправок  $\Delta E_n^{(1)}$ :

$$\Delta E_n^{(1)} = -U_0 \Delta e_n^{(1)}(k, \beta_n), \quad (66)$$

де

$$\Delta e_n^{(1)}(k, \beta_n) = \frac{8}{\xi \pi Q_n(\beta_n R_0)} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_1(\zeta_p) \left[ -2\xi \pi^2 m_p^{(0)}(k, \zeta_p) I_1^*(p, n) + n_p^{(0)}(k, \zeta_p) I_2^*(p, n) \right]. \quad (67)$$

При організації обчислень функцій  $\Delta e_n^{(1)}(k, \beta_n)$  необхідно враховувати аналітичні властивості числових послідовностей  $\Omega_1(\zeta_p)$ . У таблиці 3 наведені числові значення  $\Omega_1(\zeta_p)$  для перших десяти коренів  $\zeta_p$  рівняння (39), які були визначені при значеннях параметра  $k = R/R_0 = 1,25; 1,67; 2,50$  і  $5,00$ .

З наведених у таблиці даних випливає, що числа  $\Omega_1(\zeta_p)$  при різних значеннях параметра  $k$  утворюють різні послідовності, які сходяться до різних меж. При  $R_0/R = 0,8$  ( $k = 1,25$ ) числа  $\Omega_1(\zeta_p)$  утворюють лише одну числову послідовність, і сумування у формулі (67) можна припиняти на довільному номері  $p$ , значення якого визначається прийнятою похибкою обчислень. При  $R_0/R = 0,6$  ( $k = 1,6(6)$ ) можна углядіти чотири послідовності. При цьому необхідно сумувати парне число послідовно розташованих четвірок чисел  $\Omega_1(\zeta_p)$ . При  $R_0/R = 0,4$  ( $k = 2,50$ ) проглядаються три числові послідовності, і необхідно підсумувати парне число трійок чисел  $\Omega_1(\zeta_p)$ . При значенні  $R_0/R = 0,2$  ( $k = 5,00$ ) знову з'являються чотири послідовності, і знову необхідно сумувати парне число четвірок чисел  $\Omega_1(\zeta_p)$ . З усього сказаного

впливає єдиний висновок – перед початком обчислень для кожного конкретного значення параметра  $k = R/R_0$  необхідно виконати дослідження числових послідовностей  $\Omega_1(\zeta_p)$ . Це дозволить поліпшити точність подальших обчислень і підвищить достовірність результатів обрахунку.

Таблиця 3

**Числові значення функції  $\Omega_1(\zeta_p) = J_1(\zeta_p) - J_1(k\zeta_p)N_1(\zeta_p)/N_1(k\zeta_p)$  для перших десяти коренів трансцендентного рівняння  $J_0(x)N_1(kx) - J_1(kx)N_0(x) = 0$**

p	$\zeta_p$			
	k = 1,25	k = 1,6(6)	k = 2,50	k = 5,00
1	-2,385497(-01)	5,782499(-01)	-2,990785(01)	-2,656170(00)
2	-1,907371(-01)	-3,276138(00)	5,918629(-01)	2,957784(00)
3	-1,635730(-01)	-2,333630(-01)	-3,694197(-01)	6,529087(-01)
4	-1,454753(-01)	4,988860(00)	1,355009(00)	5,143017(-01)
5	-1,323057(-01)	1,734729(-01)	3,567331(-01)	1,001103(00)
6	-1,221691(-01)	-6,251137(00)	-2,455062(-01)	-1,115489(00)
7	-1,140549(-01)	-1,442484(-01)	9,135880(-01)	-3,891323(-01)
8	-1,073692(-01)	7,298745(00)	1,794554(-01)	-3,525693(-01)
9	-1,017365(-01)	1,261117(-01)	-1,968125(-01)	-7,610190(-01)
10	-9,690658(-02)	-8,213966(00)	7,338983(-01)	8,102446(-01)

Для визначення поправок  $\Delta M_p^{(1)}$  і  $\Delta N_p^{(1)}$  підставимо в рівняння (51) і (52) наближені значення констант  $E_n \approx E_n^{(0)} + \Delta E_n^{(1)}$ ,  $M_p \approx M_p^{(0)} + \Delta M_p^{(1)}$  і  $N_p \approx N_p^{(0)} + \Delta N_p^{(1)}$ . Беручи до уваги раніше використовувані співвідношення (55) і (56), отримуємо такі результати:

$$-\frac{\pi U_0}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} (1+2n) \Delta e_n^{(1)}(k, \beta_n) W_0(\beta_n \rho) + \frac{1}{\xi R_0} \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right) \left[ \Delta M_p^{(1)} \operatorname{sh} \left( \frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0} \right) + \Delta N_p^{(1)} \operatorname{ch} \left( \frac{\zeta_p \alpha}{\xi R_0} \right) \right] = 0, \quad (68)$$

$$-U_0 \sum_{n=0}^{\infty} \Delta e_n^{(1)}(k, \beta_n) W_0(\beta_n \rho) + \sum_{p=1}^{\infty} \zeta_p \Omega_0 \left( \frac{\zeta_p \rho}{R_0} \right) \Delta M_p^{(1)} = 0, \quad (69)$$

Очевидно, що поправки  $\Delta M_p^{(1)}$  і  $\Delta N_p^{(1)}$  визначаються з системи рівнянь (68), (69) через заданий потенціал  $U_0$  єдиним чином. Після визначення поправок  $\Delta M_p^{(1)}$  і  $\Delta N_p^{(1)}$  з рівняння (50) визначається поправка  $\Delta E_n^{(2)}$ . Для цього в рівняння (50) підставляються наступні наближені значення коефіцієнтів  $E_n \approx E_n^{(0)} + \Delta E_n^{(1)} + \Delta E_n^{(2)}$ ,  $M_p \approx M_p^{(0)} + \Delta M_p^{(1)}$  і  $N_p \approx N_p^{(0)} + \Delta N_p^{(1)}$ . Потім з рівнянь (51) і (52) визначаються поправки  $\Delta M_p^{(2)}$  і  $\Delta N_p^{(2)}$ , і після цього – поправка  $\Delta E_n^{(3)}$ . Після цього цикл обчислень знову повторюється аж до досягнення заданої точності обчислень.

Після визначення з призначеною точністю констант  $E_n$ ,  $M_p$  і  $N_p$ , визначаються константи  $A_{1n}$ :

$$A_{1n} = \frac{W_0(\beta_n R_0)}{I_0(\beta_n R_0)} \left[ E_n^{(0)} + \sum_{\nu=0}^{\infty} \Delta E_n^{(\nu)} \right]. \quad (70)$$

Таким чином, в математичному описі скалярних потенціалів електричного поля у внутрішній і зовнішній областях п'єзоелектричного елемента точно визначаються лише константи  $A_{2m}$ . Константи  $A_{1n}$ ,  $E_n$ ,  $M_p$  і  $N_p$  визначаються наближено. Похибка наближеного визначення цих констант контролюється в процесі виконання обчислень.

**Висновки**

1. Дано загальне формулювання граничної задачі про розрахунок скалярного потенціалу вісесиметричного електричного поля в диску, матеріал якого має анізотропну діелектричну проникність, яка мінімум на порядок перевершує діелектричну проникність вакууму.
2. Запропоновано схему рішення задачі для випадку, коли розташовані на торцевих поверхнях диска електроди мають форму співвісно розташованих круга та кільця, причому зовнішній радіус кільця дорівнює радіусу діелектричного диска, а радіус круга збігається з внутрішнім радіусом кільця.
3. Запропонована схема рішення задачі використовує метод послідовних наближень, що дозволяє отримати аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів в математичному описі потенціалу електричного поля в об'ємі диска з анізотропною діелектричною проникністю.



## Література

1. Богдан А.В. Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники / А.В. Богдан, О.Н. Петрищев, Ю.И. Якименко, Ю.Ю. Яновская // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 2. – С. 35–42.
2. Джагупов Р.Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления / Р.Г. Джагупов, А.А. Ерофеев. – СПб : Политехника, 1994. – 608 с.
3. Варадан В. VЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
4. Петрищев О.Н. Principles of calculation of piezoelectric elements with surfaces partial covering by electrodes / О.Н. Петрищев, В.М. Шарапов, Ж.В. Сотула, К.В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2014. – № 3. – С. 47–55.
5. Sharapov V. Piezoceramic sensors, Springer Verlag, 2011, 498 p.
6. Сотула Ж.В. Підвищення рівня звукового тиску, створюваного мономорфними дисковими п'єзоелементами / Ж.В. Сотула // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 178–181.
7. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. – Киев : Наукова думка, 1989. – 280 с.
8. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. – М. : Высшая школа, 1970. – 712 с.
9. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Специальные функции / Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. – М. : Наука, 1983. – 752 с.
10. Джеффрис Г. Методы математической физики. Выпуск 2 / Джеффрис Г., Свирлс Б. – М. : Мир, 1970. – 352 с.

## References

1. Bogdan A.V., Petrishchev O.N., Yakimenko Yu.I., and Yanovskaya Yu.Yu. Matematicheskoe modelirovanie kolebanij tonkix p'ezokeramicheskix diskov dlya sozdaniya funkcional'nykh e'lementov p'ezoe'lektroniki. E'lektronika i svyaz', Tematicheskij vypusk E'lektronika i nanotexnologii, 2009, P. 2, pp. 35–42.
2. Dzhagupov R.G. and Erofeev A.A. P'ezoelektronnye ustroystva vychislitel'noy tekhniki, sistem kontrolya i upravleniya. Politekhnika, Sankt-Peterburg, 1994, 608 p.
3. Varadan V., Vinoy K. and Dzhoze K. VCh MEMS i ikh primenenie. Tekhnosfera, Moskva, 2004, 528 p.
4. Petrishchev O.N., Sharapov V.M., Sotula Zh.V. and Bazilo K.V. Principles of calculation of piezoelectric elements with surfaces partial covering by electrodes. Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu, 2014, No. 3, pp. 47–55.
5. Sharapov V. Piezoceramic sensors, Springer Verlag, 2011, 498 p.
6. Sotula Zh.V. Pidvyshhennja rivnja zvukovogo tysku, stvorjuvanogo monomorfnyimi diskovymi p'jezoelementamy, Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu, Technical sciences, Khmelnytsky 2014, No. 5, pp. 178–181.
7. Grinchenko V.T., Ulitko A.F. and Shul'ga N.A. Mekhanika svyazannykh poley v elementakh konstruksiy. Vol. 5. Elektouprugost', Kiev, Naukova dumka, 1989, 280 p.
8. Koshlyakov N.S., Gliner E.B. and Smirnov M.M. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki, Moskva, Vysshaya shkola, 1970, 712 p.
9. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A. and Marichev O.I. Integraly i ryady. Spetsial'nye funktsii, Moskva Nauka, 1983, 752 p.
10. Dzheffris G. and Svirls B. Metody matematicheskoy fiziki. Issue 2, Moskva Mir, 1970, 352 p.

Рецензія/Peer review : 2.10.2018 р.

Надрукована/Printed :23.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Палагін В.В.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
РОЗКРЯЖУВАННЯ КРУГЛИХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ**

*Економне використання сировини є однією з найважливіших задач, що підлягають розв'язанню під час планування, організації і управління виробництвом. Економія сировини може бути досягнута за рахунок реалізації оптимальних способів розкрою сировини. Мета статті – розглянути можливості оптимізації довжини пиловочних колод при розкряжуванні хлистів. Сформульовано та розв'язано оптимізаційну задачу, де цільовою функцією є об'ємний вихід заготовок з хлиста. Розв'язання даної задачі зведено до визначення коренів степеневого рівняння третього порядку. В ході визначення оптимальних довжин колод при розпилюванні хлистів сосни та вільхи з найбільш типовими параметрами використано інтерактивне середовище розробки Matlab. Отже, в статті розроблено практичні рекомендації для деревообробного підприємства з розкряжування хлистів. З позиції максимуму об'ємного виходу заготовок при відомих розмірах хлистів та заданих параметрах заготовок однозначно визначено оптимальні довжини колод для виготовлення заготовок заданої розмірної групи.*

*Ключові слова: розкряжування лісоматеріалів, максимум об'ємного виходу, оптимізація, Matlab.*

T.N. KYSIL, O.YA. KUCHERUK, T.O. OSIICHUK  
Khmelnytsky National University

**MATHEMATICAL MODELING FOR CUTTING OF ROUND TIMBERS**

*Economical use of raw materials is one of the most important tasks to be solved in the planning, organization and management of manufacture. Saving raw materials can be achieved by the implementation of optimal methods for cutting raw materials. The purpose of the article is to consider the possibilities of optimization of the round timber length. An optimization problem, where the objective function is the volume output of blanks, was formulated and solved. The solution of this problem is reduced to the finding of the roots of the third order power equation. For determining the optimal lengths of timbers, an interactive development environment of Matlab was used. Consequently, in the article practical recommendations for the woodworking company for the cutting of round timber are developed. From the position of the maximum volume output of the billets with known sizes and the specified parameters of the billets, the optimal lengths of timbers for the manufacture of billets of a given size group are uniquely determined.*

*Key words: Cutting of round timber, volume output, optimization, Matlab.*

**Вступ**

Деревообробна промисловість є традиційною галуззю вітчизняної економіки та основним постачальником виробів з деревини на внутрішньому ринку та відповідно основним споживачем лісоматеріалів. Найбільше круглих лісоматеріалів використовує лісопилна промисловість, яка слугує сировинною базою для подальшої деревообробки.

Економне використання сировини є однією з найважливіших задач, що підлягають вирішенню при плануванні, організації і управлінні виробництвом. Економія сировини може бути досягнута за рахунок реалізації оптимальних способів розкрою сировини.

«Важливим фактором раціонального використання деревини є збільшення об'ємного, сортового і специфікаційного виходів пиломатеріалів, що може бути досягнуто за рахунок підвищення ефективності лісопилного виробництва, технічного переозброєння лісопилних підприємств на базі сучасного обладнання і технології із застосуванням обчислювальної техніки» [1].

Сировиною для лісопилного виробництва є колоди та кряжі різних деревних порід, які одержують при розкряжуванні хлистів.

В залежності від умов виробництва і споживання лісоматеріалів при розкряжуванні хлистів повинні бути оптимізовані ті чи інші критерії, що характеризують техніко-економічні показники розкрою. Оптимізація техніко-економічних показників розкрою хлистів дозволяє поліпшити економічні результати роботи лісозаготівельних та деревообробних підприємств. Тому кожен хлист повинен бути розкряжованим за оптимальною схемою, тобто схемою, яка в найбільшій мірі задовольняє конкретні вимоги.

Визначення оптимальної довжини колод є важливою задачею, оскільки постачання сировини на лісопилно-деревообробні підприємства відбувається в хлистах.

Проблеми оптимізації процесів деревообробки розглядали в своїх працях Т. Коваль, А. Піжурин, В. Подкоритов, Е. Віллістон, Г. Крилов, В. Пятков, М. Розенбліт, В. Коваль, Т. Носовський.

З огляду на те, що корисний вихід половника залежить від багатьох факторів, врахування яких дозволяє його покращити, доцільно розглянути можливості оптимізації довжини пиловочних колод при розкряжуванні хлистів.

**Експериментальна частина**

Припустимо, що пиловочна зона хлиста має форму зрізаного конуса, довжина (висота) якого  $L$ , діаметри основ  $d$  та  $D$ . Хлист розкряжовано на  $n$  пиловочних колод однакової довжини  $x = L/n$ . Тоді верхні торцеві діаметри одержаних колод утворюють послідовність  $d, d+\Delta, d+2\Delta, \dots, d+(n-1)\Delta$ . Очевидно, що

$$\Delta = \frac{D-d}{n} \quad [2].$$

З кожної одержаної колоди в подальшому виготовляють брус оптимальних розмірів. Його переріз,

як відомо, – це квадрат із стороною  $\frac{d+i\Delta}{\sqrt{2}}$ ,  $i = \overline{0, n-1}$ . Тоді загальний об'єм всіх брусків виготовлених з одного хлиста

$$V_6 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(d+i\Delta)^2}{2} \cdot x = \frac{x}{2} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (d+i\Delta)^2. \quad (1)$$

Вираз (1) після елементарних перетворень набуває вигляду

$$V_6 = \frac{L}{2} \cdot \left[ d^2 + (n-1)d\Delta + (n-1)(2n-1)\frac{\Delta^2}{6} \right]. \quad (2)$$

Об'єм пиловочної зони хлиста (як об'єм зрізаного конуса) можна визначити наступним чином:

$$V_x = \frac{\pi L}{12} (d^2 + D^2 + dD). \quad (3)$$

Якщо припустити, що середній об'ємний вихід пиломатеріалів з одержаних брусків –  $k_6$ , то коефіцієнт об'ємного виходу пиломатеріалів з хлиста:  $k = k_6 \cdot \frac{V_6}{V_x}$  [2]. Враховуючи (2) та (3), одержимо

$$k = k_6 \cdot \left( \frac{2}{\pi} - ax + bx^2 \right), \quad (4)$$

де

$$a = \frac{3(D^2 - d^2)}{\pi L(d^2 + D^2 + dD)}; \quad b = \frac{(D-d)^2}{\pi L^2(d^2 + D^2 + dD)}. \quad (5)$$

При розпилюванні брусків одержують дошки для виготовлення специфікацій заготовок. Всі заготовки можна розбити на групи за довжиною. Всі заготовки певної групи виготовляються з дощок фіксованої довжини  $x$ . Діапазон довжин заготовок кожної групи  $[l_{\min}, l_{\max}]$  обирається так, що в кожній групі на довжині дошки розміщується однакова кількість заготовок. Відхід (залишок) по довжині дошки дорівнює  $l_{\text{відх}} = x - lm$ , де  $m$  – кількість заготовок, що розмістилась на дошці. Очевидно,  $0 \leq l_{\text{відх}} \leq l_{\min}$ .

Якщо довжину заготовок на множині специфікацій розглядати як випадкову величину, то математичне сподівання для величини  $l_{\text{відх}}$  можна вважати рівним  $\bar{l}_{\text{відх}} = \frac{l_{\min}}{2}$ . Тоді середній коефіцієнт використання дошки за довжиною (коефіцієнт лінійного виходу заготовок):  $k_l = 1 - \frac{l_{\min}}{2x}$ . Коефіцієнт об'ємного виходу заготовок з хлиста:  $k_V = k \cdot k_l \cdot k_S$ , де  $k_S$  – коефіцієнт використання площі дошки [2].

Отже,

$$k_V = k_6 \cdot k_S \cdot \left( \frac{2}{\pi} - ax + bx^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{l_{\min}}{2x} \right). \quad (6)$$

Таким чином одержуємо задачу:

$$k_V \rightarrow \max, \text{ при умові } 0 \leq x \leq L \quad (7)$$

Прирівнюючи похідну функції  $k_V$  по змінній  $x$ , одержимо рівняння

$$x^3 - c_1 x^2 + c_2 = 0, \quad (8)$$

де

$$c_1 = \frac{3L(D+d)}{2(D-d)} + \frac{l_{\min}}{4}; \quad c_2 = \frac{l_{\min} L^2 (d^2 + D^2 + dD)}{2(D-d)^2}. \quad (9)$$

Функція  $k_V$  є опуклою вгору лише на проміжку  $\left( 0; \frac{2c_1}{3} \right) \supset (0; L)$ , тому саме на цьому проміжку вона досягає свого максимуму.

Отже, для знаходження розв'язку задачі (7), необхідно віднайти корінь рівняння (8), що задовольняє умові  $0 \leq x \leq L$ .

Пошук даного кореня здійснювався за допомогою інтерактивного середовища розробки Matlab (лістинг програми представлено на рис. 1).

```
L=[22 21 20 19 18 17];
D=[0.30 0.28 0.27 0.25 0.23 0.20];
d=[0.16 0.15 0.14 0.12 0.11 0.1];
lmin=[2 2 2 2 2];
format bank;
A=3*L.*(D+d)./(2.*(D-d))+lmin/4;
```

```

B=lmin.*L.^2.*(D.^2+d.^2+d.*D)./2./(D-d).^2;
lopt=zeros(1,prod(size(L)));
V=zeros(prod(size(L)),5);
for i=1:prod(size(L)),
    X=roots([1 -A(i) 0 B(i)]);
    for j=1:prod(size(X)),
        if (X(j)>lmin(i) & X(j)<L(i)),
            lopt(i)=X(j);
        end;
    end;
    V(i,:)= [L(i),D(i), d(i),lmin(i),lopt(i)];
end;

```

Рис. 1. Лістинг програми

Значна кількість підприємств, що займається розпилюванням пиловочної сировини орієнтовані на конкретні розмірні групи пиломатеріалів [3, 4].

Були проведені експериментальні дослідження з визначення оптимальної довжини колоди при розпилюванні хлестів сосни та вільхи з найбільш типовими параметрами ( $L$ ,  $D$ ,  $d$ ). Під час експериментальних розрахунків було розглянуто розмірні групи пиломатеріалів, що виготовляє одне з деревообробних підприємств Рівненської області ( $2 \leq l \leq 6$ ). Початкові дані та результати досліджень представлено в табл. 1.

Таблиця 1

## Експериментальні та розрахункові дані

Номер експерименту	$L, м$	$D, м$	$d, м$	$l_{min}, м$	$x, м$	$x_p, м$	$P, \%$
1	22	0,30	0,16	2	6.27	6.5	88,6
2	21	0,28	0,15	2	6.15	6.5	92,9
3	20	0,27	0,14	2	5.88	6.0	90,0
4	19	0,25	0,12	2	5.48	5.5	86,8
5	18	0,23	0,11	2	5.32	5.5	91,7
6	17	0,20	0,10	2	5.31	5.5	97,1

Визначені оптимальні значення довжини колод потребують округлення [2]. В таблиці 1 наведено рекомендовані довжини колод ( $x_p$ ) для розкрязування хлестів відповідних довжин та розраховано корисний вихід ( $P$ , %) пиловника з хлиста.

## Висновки

Розроблено практичні рекомендації для деревообробного підприємства з розкрязування хлестів. З позиції максимуму об'ємного виходу заготовок при відомих розмірах хлестів та заданих параметрах заготовок однозначно визначено оптимальні довжини колод для виготовлення заготовок заданої розмірної групи.

Дана робота є основою для планування робіт з розкрязування хлестів та підготовки пиловочної сировини.

## Література

1. Коваль Т.В. Математичне моделювання розкрою круглих лісоматеріалів на пиломатеріали / Т. В. Коваль // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2014. – Вип. 198(1). – С. 193-198.
2. Пижурин А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: МГУЛ, 2004. – 375 с.
3. Коваль В. С. Виробництво пиломатеріалів / В. С. Коваль, О. О. Пінчевська. – К.: Аграр медіа Груп, 2011. – 188 с.
4. Носовський Т. А. Технологія лісопильно-деревообробних виробництв / Т. А. Носовський, Р. І. Мацюк, В. В. Маслій. – Київ: НМК ВО, 1993. – 190 с.

## References

1. Koval T.V. Matematychnе modeliuвання rozkroiu kruhlykh lisomaterialiv na pylomaterialy / T. V. Koval // Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. – 2014. – Vyp. 198(1). – S. 193-198.
2. Pizhurin A. A. Modelirovanie i optimizatsiya protsessov derevoobrabotki / A. A. Pizhurin, A. A. Pizhurin. – M.: MGUL, 2004. – 375 s.
3. Koval V. S. Vyrobnystvo pylomaterialiv / V. S. Koval, O. O. Pinchevska. – K. Ahrar media Hrup, 2011, – 188 s.
4. Nosovskyi T. A. Tekhnolohiia lisopylno-derevoobrobnykh vyrobnyststv / T. A. Nosovskyi, R. I. Matsiuk, V. V. Maslii, Kyiv NMK VO, 1993, – 190 s.

Рецензія/Peer review : 17.10.2018 р. Надрукована/Printed :23.11.2018 р.  
Рецензент: д. ф.-м. н., проф. Бедратюк Л. П.

## COMPUTER MODELING OF FLOWER PISTIL THERMOREGULATION

*A bionic model of thermoregulation of a flower pistil of fruit plants is presented, on the basis of which a computer program "BioNA-2" for conducting a numerical experiment was created. The central concept of this model is the author's abstract 5-petal flower of a parabolic shape. The geometry of this flower is well described mathematically. The main dimensions of the flower and the flower pistil are very realistic. The given model has the series of simplifications and limitations, namely: "no wind" weather, direct sunrays only that fall upon the flower petal surface; 6 degrees of transparency of the Earth's atmosphere; the model flower corolla is vertical directed to the Sun (or its zenithal orientation); the wavelength of the Sun's radiation falling on the flower is limited to values from 300 to 700 nm, which was dictated by the instrumental data on the spectrum of reflection of the petals that were available. Within the framework of presented computer model, calculations of the solar radiation power (the direct rays only) reflected from the floral petals of different basic colors were made. The calculations take into account the standard characteristics of the solar spectrum on the Earth's surface and the spectrum of reflection of the petals of certain colors – white, yellow, red, blue and purple ones – as the basic flower petal colors. As a result of the calculations performed, taking into account the adopted model assumptions, the following outcomes were obtained for various atmospheric transparencies: 1) it was found out that under all equal conditions the least effective reflector turned out to be the purple petals; 2) the temperature difference between the outside air and the flower pistil was calculated after a 2-minute exposure in the sun under different insolation conditions: the obtained results are in good agreement with experimental data; 3) as a result of the numerical experiment accordingly to the assumed model it was also found that the flower of the parabolic form developed in the course of its evolution the ability for effective thermoregulation of the pistil, despite a significant change in the ambient air temperature.*

**Keywords:** bionic model, physics-based simulations, numerical experiment, flower pistil thermoregulation.

A.O. ЧЕПОК

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЦВЕТКОВОГО ПЕСТИКА

*Представлена бионическая модель терморегуляции пестика цветка плодового растения. На основе этой модели создана компьютерная программа «BioNA-2». Центральной фигурой этой модели есть авторский «абстрактный» 5-лепестковый цветок параболической формы. Геометрия этого «цветка» хорошо описывается математически. Основные параметры модельного цветка и цветкового пестика очень реалистичны. Данная модель имеет ряд ограничений и упрощений: предполагается безветренная погода; учитывается воздействие только прямых солнечных лучей; 6 степеней прозрачности земной атмосферы; зенитная ориентация цветкового венчика; расчеты производятся в ограниченном диапазоне длин волн (300–700 нм). В рамках принятой модели произведены расчеты температуры пестика при различных внешних условиях. При расчетах учитывались особенности спектра солнечного излучения на уровне моря и спектров отражения лепестков 5 базовых пигментов – белого, желтого, красного, синего и фиолетового. В результате выполненного численного эксперимента выяснилось, что наименее эффективными с точки зрения терморегуляции при прочих равных условиях являются лепестки фиолетового цвета. Расчеты убедительно показали, что данная форма цветка, а также параметры цветкового венчика и пестика хорошо «приспособлены» для успешной терморегуляции пестика при разных погодных условиях и разного вида инсоляции, что есть результатом эволюции цветковых растений. Расчеты, проведенные на основе предложенной модели, хорошо согласуются с независимыми экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** бионическая модель, компьютерное моделирование, биофизика, терморегуляция цветкового пестика.

### Introduction

The floral diversity of the Earth impresses our imagination. And from our school years we know that plants are been developing at least 475 million years, and flowering plants appeared about 130 million years ago, and flowers play an important physiological function: due to them plants are able to be reproduced over and over. Thus the presence of flowers is a herald of the harvest, and this fact is no longer only beauty in its pure form.

Any plant itself is able to generate energy for its own existence – due to cellular respiration, but sometimes only this amount of energy is not enough, for example, during the flowering period [1, 2]. For guaranteed reproduction, a plant flower “learned” how to effectively use an external source of energy – the sunlight stream falling on the Earth. This energy it consumes for its living and partially accumulates to ensure the development of the seed (fetus).

Most of the fruit tree flowers have the form of a paraboloid of rotation, in the focus of which is a flower pistil. Due to this form, the radiant solar energy, which is captured and reflected by the blossom petals, is transferred to the flower pistil when blooming.

But there is, it would seem, a simple question: why exactly the paraboloid form? Why do plants need this form of a flower? What preferences can give their own parabolic form for fruit plant flowers? Usually such questions are answered well by physics and mathematics.

Despite the significant growth of the number of publications on biological topics in which “serious” mathematics is applied, the author has not found any studies on the thermodynamic balance of the internal cavity of fruit plant flowers.

It is well-known fact [3-6] that the *basic flower petal colors* are: white, yellow, red, blue and purple. The search for information in scientific sources about the influence of the color of the petals on the flower pistil thermoregulation did not give any answers to questions connected with the dependence of certain parameters of the thermodynamics of the internal cavity of the flower on the reflection spectrum of the petals.

In this paper the author is interested in the answer to the following question: which of the basic petal pigments are the most effective reflectors of the light incident on them? Therefore, the main direction of the research is the study of the spectral factor on thermodynamic processes in the flowers of fruit trees.

The current work is the evolution of the last year's research (it was the "BioNA-1" program as the result of [7]). The previous model operated with an averaged *albedo* of flower petals. In its present form, the work results one can present as the computer program "BioNA-2", designed to perform a numerical experiment and visualize the results obtained, according to the basic equation of the thermodynamic balance of the flower pistil, taking into account a number of external and internal factors that affect the fertility of fruit plants to varying degrees. In this work the main attention is paid to the search for the influence of the color of petals of the flower corolla on the flower pistil thermoregulation.

Wishing to continue the work begun last year on modeling the thermodynamic balance of a flower pistil that is exposed to solar radiation, the author used data of spectrometric measurements published by other researchers (see the list below).

The **objective of the work** was to create a computer model capable to reflect adequately the process of additional heating of the flower pistil by focusing the direct sunlight using its corolla petals. This model is based on a number of simplifications and operates with the specially created "*abstract flower*" and at the same time takes into account some external and internal (relative to the flower) factors.

The **research tasks** were: 1) researching and finding of the temperature dependence of the flower pistil from the geometric and optical properties of the flower, as well from some external factors, and 2) on the basis of the found relationships one has to create a computer program capable to make the appropriate calculations, as well as to provide 2D-3D visualization of simulation results.

The **object of study of the work** were the processes of thermoregulation of the fruit flower pistil (the flower has the form of a paraboloid of rotation), and the determination of the dependence of these processes on the transparency of the atmosphere, the ambient temperature and the optical properties of the petals of the flower.

The **subject of the study of the work** is temperature dependence of the pistil of the mentioned "abstract" flower on time and other specified factors, provided only direct sunlight falls upon the 5-petal flower [8], which is oriented zenithal to the Sun. Why exactly 5 pieces of petals? Because the 5-petal flower is the most common structure of flowers in Nature – 52.8% of all modern flower forms [8].

The input data for the current computer model are: tabular physical quantities; spectral and energy characteristics of solar radiation; mathematically processed spectrometric data from different researchers (instrumental measurements taken from nature experiments [3, 4, 6, 9–13]); ambient air temperature; some parameters of the flower corolla and others.

The output data for the computer model are: calculated values of the temperature of the flower pistil over time under various conditions of its insolation and ambient temperature; the effectiveness degree of the thermal stabilization of the flower pistil for the mentioned five basic colors of the flower petals; visualization of the solution of the energy balance equation in the form of the corresponding plot.

#### **The presented mathematical model in general**

The flower as an organ of a plant, after millions of years of its evolution, has developed in itself abilities at a certain time of vegetation (when there is a need for an additional source of energy) to get such "useful adaptation" as petals that not only attract pollinator insects, but also able to accumulate the radiant energy of the Sun. This "adaptation" should help to warm their "future descendants", and do it in time, i.e. in the period of relatively cool days (within our latitudes this is April-May). But the same petals must leave the flower in time too, if the plant no longer needs insect help and the air will be warmer (usually it happens in the summer).

It is no coincidence that the floral corolla, or its crown, has the form of a paraboloid of revolution: evolution of plants has "considered" exactly this form of flowers as the optimal one. The reason for this is the optical properties of the paraboloid: it focuses all the rays that it – a paraboloid – was "able to catch" by its own cross section [14].

#### **Flower under the Sun: what are we going to take into account?**

Let's look at the Sun as a giant radiation generator. When an imaginary flower is under the Sun, it does absorb radiant energy and will be heated at the same time. In Nature, for the stable existence of something, there must be an energy balance.

Consider the thermodynamic balance of a small biological object – the flower pistil. In reality, the pistil can be heated by absorbing sunlight – both direct and scattered ones, and it can cool down due to both convection types – natural and forced ones, and also due to its own radiation as an already heated body (see Fig. 1).

The proposed author's model of thermoregulation of a flower pistil has several simplifications: neither forced convection ("*no wind*") nor absorption of scattered sun rays is taken into account. In addition, the flower itself is not the same, natural, but "mathematical". A natural flower has many parameters. But, in order not to "get lost in unnecessary details" of a real flower, an "artificial" or "abstract" Flower was chosen to build a computer model of the process.

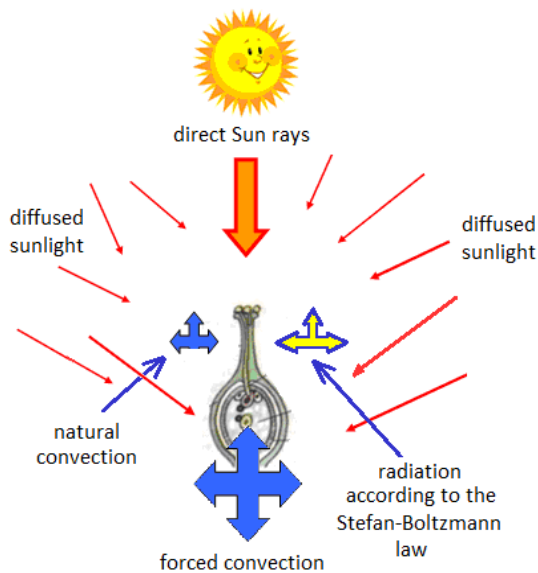


Fig. 1. The scheme of the main energy flows to and from a flower pistil (as a flower is under the Sun)

**About the “abstract” flower and general requirements for the mathematical model which used**

The author's concept of an “abstract” flower is very similar to a natural flower of the same structure, while the “abstract” flower is easy to describe mathematically. The main parameters of the “abstract” flower are similar for many flowers of ordinary fruit plants. This model “flower” itself fits into a paraboloid of rotation. The description of the flat projection of its petals was based on the well-known equation called the *5-petal polar rose*:  $\rho = A \cdot \sin(5\varphi/3)$ , where  $A$  is the largest parameter of the petals (Fig. 2a).

Fig. 2b shows the visualization of the results of calculations of the path of vertically incident sun rays upon the corolla, followed by their reflection from the flower petals.

In the Table 1 it is presented some parameters of the “abstract” flower used for modeling. Some physical characteristics of the plant tissue used in the author's model are identical to natural ones, namely the density of the biological tissue, the specific heat capacity, petal colors and so on [15, 16]. Such an abstraction allows us to concentrate on the main task of this study – the search for the dependence of the thermoregulation of a flower pistil on the color of the flower petals as well the atmospheric transparency.

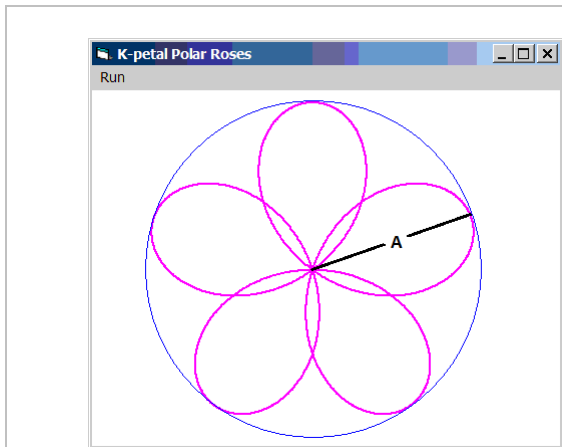


Fig. 2a. The general view of the 2D projection of the “abstract” flower, which is the basic element for the author's computer model

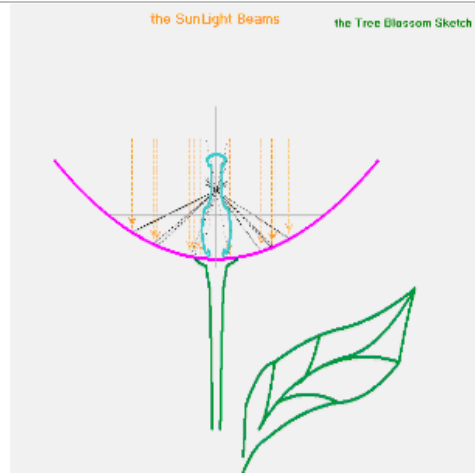


Fig. 2b. the scheme that is adopted in the author's model: the illustration of the zenithal arrangement of the flower corolla as well Sun rays that fall vertically

Table 1

**Some parameters of the "abstract" flower which is used in the model:**

The external diameter of the Flower =	2.83 cm
The total height of the Flower pistil =	15 mm
The maximum diameter of the Flower pistil =	2.3 mm
The mass of the pistil =	47 mg

When making the current computer model, the author took into account such assumptions and limitations:

- in order to imitate the real flowers and their basic properties the concept of an “abstract” flower (hereinafter referred to the **Flower**) was introduced, which concentrated several real features and parameters of natural flowers of fruit plants, for example, 1) the general structure of the Flower (this is a 5-petal flower, the corolla of a such flower is a paraboloid of rotation); 2) the geometric dimensions of the biological object (see Table 1); 3) the five basic colors of the Flower petals – white, red, yellow, blue and purple [4, 5, 10, 11];

- only one orientation of the Flower with respect to the Sun was considered – the *zenithal position of the Flower corolla*, that is, the axis of symmetry of the paraboloid is directed vertically, and the Sun rays fall on the floral corolla also vertically (Fig. 2b);

- it is assumed that *there is no wind*, that is, in the final equation of the model, one did not take into account the forced convection;

- in the final equation of the model *only direct solar radiation* is taken into account – and that radiant energy that falls directly on the pistil, as well as energy that is absorbed by the pistil after reflection from the Flower petals;

- the model takes into account the “fine structure” of the following spectra: 1) the solar spectrum as the generator of radiant energy, 2) the reflection spectrum of the five floral petal pigments. These spectral factors are very important for constructing an adequate model for the thermoregulation of the Flower pistil;

- in the presented model the spectrum of solar radiation with a wavelength from the range of 300 nm to 700 nm ( $\lambda \in [300 \dots 700]$  nm), or from ultraviolet up to red rays) is taken into account.

### **On the characteristics of the chosen mathematical model. The Solar spectrum and the Spectrum of reflection of basic petal colorants**

The computer model created for more accurate calculations of the temperature balance of the flower pistil should reflect the interaction of the “fine structures” of both spectra – the spectrum of the EM-radiation generator (it is the Sun), and the spectrum of the reflector of this radiation. Such information can be gathered from scientific sources, where the results of instrumental measurements of the solar spectrum as a generator of radiant energy are collected [17, 18], as well as the results of measurements of the absorption or reflection spectra of petals of various colors.

For this, a number of relevant scientific papers on the spectra of the reflection of multicolor flower petals were found and studied [3–6, 9–13]. The purpose of such a search work is to obtain unified experimental data suitable for application in the current mathematical model. The experimental data found in the scientific literature were obtained by various researchers, and moreover with the help of various measuring devices. Another complication in this matter was the diversity of the examined plants and the absence of any standards for determining the “purity” of the color of the floral petals. So, this is an ordinary spectroscopic question: in the absence of criteria for “unifying” the base colors, it was not entirely clear how much “such a white” color was really white, or how much “this blue” color was the blue one, and so on.

It is well known that shades of colors indicate the variability of the certain pigment concentration (in this case – *anthocyanins*). Therefore, the spectrometric data found in the scientific literature were properly “filtered” and averaged (piecewise linear spline approximation of averaged spectral data), after which they were used as a set of linear functions of  $R_{\text{petal}\#Color}(\lambda)$ , where *Petal #Color* is the certain color of the floral petals from the mentioned series of basic pigments under investigation (i.e. colors: white, yellow, red, blue and purple). In fact, these functions  $R_{\text{petal}\#Color}(\lambda)$  are spectral reflection functions for certain petal pigments.

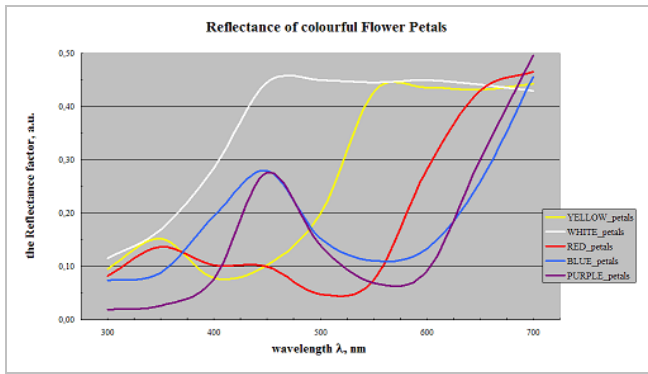
These reflection spectra  $R_{\text{petal}\#Color}(\lambda)$  for the five basic petal pigments are shown in Fig. 3a: each curve in this figure is the average reflection spectrum for each of the selected petal dye.

In Fig. 3b it is shown the emission spectra of the Sun – the author was used the one of the given spectrum which described the solar radiation at sea level, that is after the passage of sunrays through the Earth's atmosphere [18]. Note: at his disposal the author had only graphic data on the corresponding spectrum. So, these data were also digitized and as a result they acquired the form of a piecewise linear function of  $S_{\text{RadSeaLevel}}(\lambda)$ .

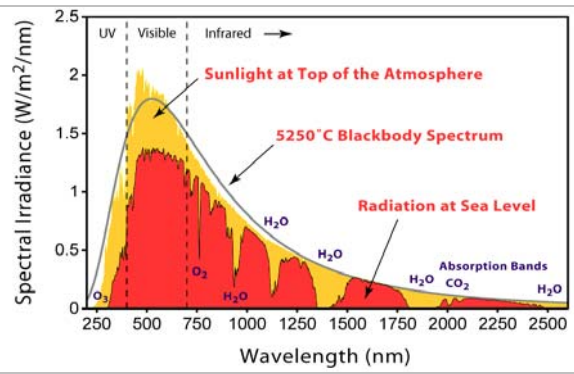
### **The final equation for the given model of a Flower pistil thermoregulation**

The actual model takes into account the fact that the floral corolla is frequently not continuous: the flower petals are rather not connected one to another, which is natural for the overwhelming number of flowers (see Fig. 4a). Such a combination of floral petals should be evaluated by a special coefficient of aperture  $F_{\text{aperture}}$ , the value of which was found through the integration of natural “openings”:  $F_{\text{aperture}} \approx 0.3$ . This value means that the effective total area of the flower petals within the model is approximately 70% of the circumference by the radius  $A$  (this circle is the section of the corresponding paraboloid of revolution!).



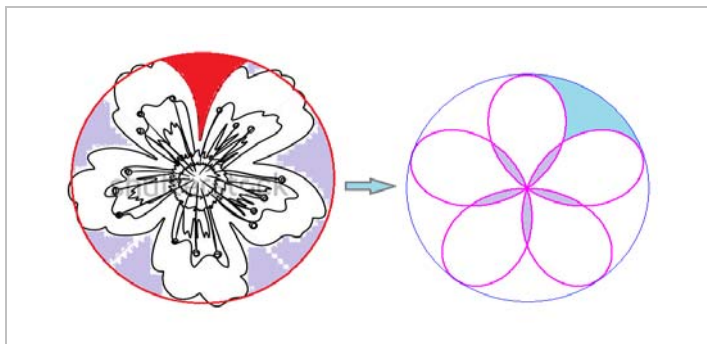


**Fig. 3a.** Spectra of reflection  $R_{petal\#Color}(\lambda)$  of petals of different colors (see the inset). The provided spectra were obtained by the author: the initial data for this were taken from the experimental data [3-6, 9-13], and then averaged and analytically “smoothed”

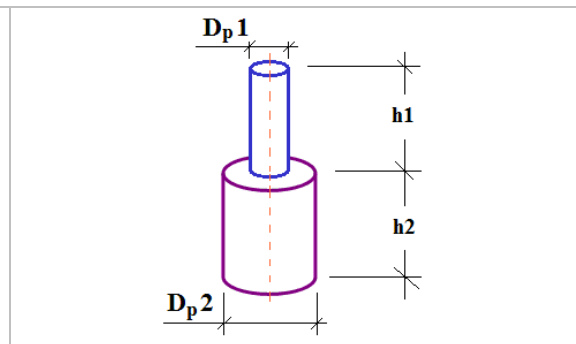


**Fig. 3b.** The Spectra of Solar radiation [18]: the spectrum of radiation at sea level (the red one at the picture) was used by author for the modelling

The pistil of the “abstract” flower was represented as a combination of two cylinders with the corresponding parameters (Fig. 4b).



**Fig. 4a.** To illustration for the mathematical modelling of the 5-petalled “abstract” Flower with certain areas of apertures between its petals (like natural openings): the sketch of a natural flower (on the left) and the taken form of an “abstract” Flower according to the considered model (right)



**Fig. 4b.** Representation of the pistil for the taken into consideration “abstract” Flower

Taking into account the parameters of the considered flower, the author believes it is suitable to find the ratio of characteristic sizes of important parts of this flower, namely the largest diameter of the flower pistil vs. the diameter of the floral corolla. The ratio of these values is about 8%, that is, a typical floral pistil one can consider as a fairly small object, but the found ratio of the parameters of the flower does not allow to perceive the pistil as a point object. And despite this, the current model does not take into account the thermal conductivity of the biological tissue for the reason of simplifying the final equation of the model.

Based on the considered “structure” of the Flower pistil one can easily get the following formulae in order to obtain corresponding values for the pistil:

The effective pistil area: $S_{sum(1+2)} = \pi \cdot (D_{p1} \cdot h_1 + D_{p2} \cdot h_2 + D_{p2}^2 / 4)$	The effective volume of the pistil: $V_{pistil} = (D_{p1}^2 \cdot h_1 + D_{p2}^2 \cdot h_2) \cdot \pi / 4$
---	---

Get going from the above assumptions and limitations, the equation of thermodynamic balance for the process of additional heating of the pistil when it is insulated by direct sunrays can be represented in this form:

$$P_+ \cdot \Delta t = (P_{conv} + P_{S-B}) \cdot \Delta t + \Delta T^\circ \cdot c_{plant} \cdot m_{plant}$$

where  $\Delta T^\circ$  is the difference between the flower pistil temperature and the ambient air temperature;

$\Delta t$  is time of insolation of the floral pistil;

$P_{conv}$  is power of natural convection of the pistil;

$P_{S-B}$  is the heat radiation power of a heated pestle according to the Stefan-Boltzmann law; here:

$$P_+ = (P_{+Solar} + P_{Solar\#Color})$$

is the total power of direct sunlight absorbed by a flower pistil, namely:

the power  $P_{+Solar}$  of direct sunlight, which is straight absorbed by the flower pistil;

the power  $P_{Solar\#Color}$  of direct sunlight reflected from the petals of a certain color:

$$P_{Solar\#Color} = Tr_{atm} \cdot \sum_{\lambda} S_{RadSeaLevl}(\lambda) \cdot R_{petal\#Color}(\lambda) \cdot S_{eff\_Petals}$$

here:  $Tr_{atm}$  is the degree of transparency of the Earth atmosphere;  $S_{RadSeaLevl}(\lambda)$  is the specific solar power at sea level (W/m<sup>2</sup>, see Fig. 3b);  $S_{eff\_Petals}$  is the total area of petals of the flower corolla as a paraboloid of rotation (the mentioned apertures are taken into accounts, see Fig. 5). One can calculate the value of  $S_{eff\_Petals}$  for the given Flower data (see Table 1):  $S_{eff\_Petals} = (1.904 \pm 0.004) \times 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Table 2 presents the degrees of transparency  $Tr_{atm}$  of the Earth's atmosphere that used in the given computer model.

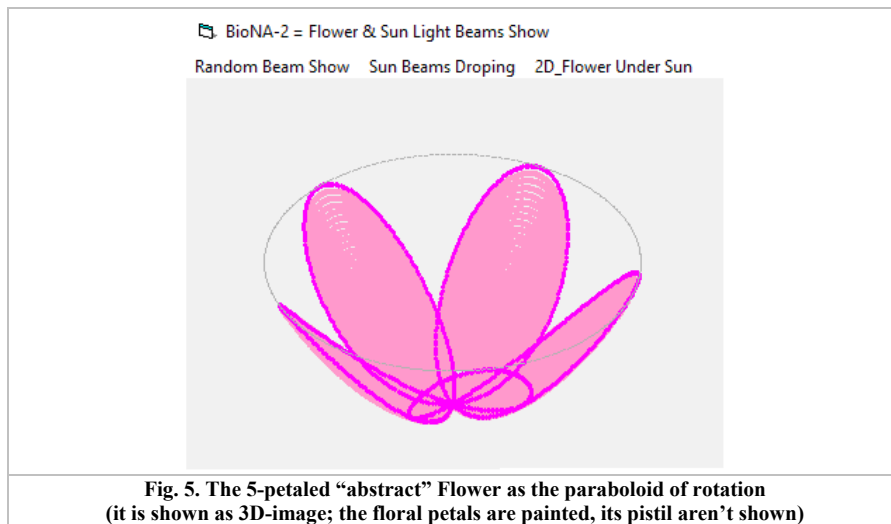








Table 2

Degrees of transparency of the Earth's atmosphere [7]

the weather symbol	interpretation of the symbol	coefficient of transparency of atmosphere $Tr_{atm}$
	Clear	$Tr_{atm} = 0,8$
	Sunny intervals	$Tr_{atm} = 0,7$
	Light clouds	$Tr_{atm} = 0,6$
	Mist	$Tr_{atm} = 0,5$
	Thick clouds	$Tr_{atm} = 0,4$
	Drizzle	$Tr_{atm} = 0,3$

Thus, one can achieve the following equation of thermodynamic balance:  $\Delta T^{\circ} \cdot c_{plant} \cdot m_{plant} = (P_{+Solar} - P_{conv} - P_{S-B}) \cdot \Delta t$ , where  $P_{conv} = h_{conv} (T - T_{air}) \cdot S_{pistil}$  and  $P_{S-B} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S_{pistil} (T^4 - T_{air}^4)$ .

The final equation of the computer model of thermoregulation of a flower pistil, obviously, has the following form (see [7]):

$$\Delta T^{\circ} = \frac{(P_{+Solar} - P_{conv} - P_{S-B})}{c_{plant} \cdot m_{plant}} \Delta t$$

And now comes the stage of computing based on the equations achieved for the given model and visualization of the results obtained.

**Software implementation of thermoregulation process modelling and obtaining results of calculations (numerical experiment)**

The author's program “BioNA-2” has a modular structure and a multi-window interface (MDI) (see Fig. 6). In order to provide the desired numerical experiment, this program uses input data of two types: 1) those that are

entered by a researcher (user) from the keyboard; and 2) those that are internal constants of the program or are previously calculated by the program.

After downloading the “BioNA-2” program, a user can access the four menu items of “Zenitar Flower View” – a demonstration of the optical properties of a paraboloid-shaped Flower located zenithically towards the Sun. The corresponding submenu items can show:

- reflection of a lonely sunbeam falling on the surface of the Flower petals (“Random Beam Show”);
- reflection of a series of incident sunlight beams (“Sun Beams Dropping”) as an illustration of the continuous stream of sunlight falling into the cup of the floral corolla;
- 2D-projection of the Flower when insulating (“2D\_Flower Under Sun”) according to the given computer model;
- 3D-projection of the model's Flower when insulating (“2D\_Flower Insolation”).

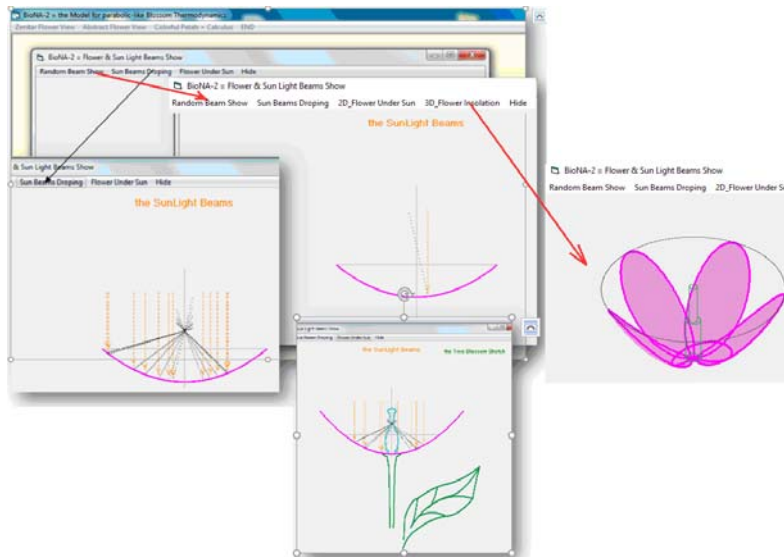


Fig. 6. The MDI-interface of the BioNA-2 program

Other forms of the program make it possible to work with the following modules:

- “Abstract Flower View” can build a flat projection of the 5-petal Flower according to the mentioned equation (see Fig. 7);
- “Colorful Petals+Calculus” opens the program module window for calculating the power of solar rays, which are reflected from the Flower petals taking into account the spectral characteristics of the light source as well the reflecting surface of the petals. The interface of this module assumes that the user chooses the degree of transparency of the Earth atmosphere (e.g. sunny, partly cloudy, light clouds, fog, cloudy), the ambient air temperature and the “right” color of the petals. The power of the radiation reflected from the Flower corolla is calculated by the program module in milliwatts (mW). Fig. 8 shows a part of the display with the results of calculations of the radiation power reflected from the colorful petals.

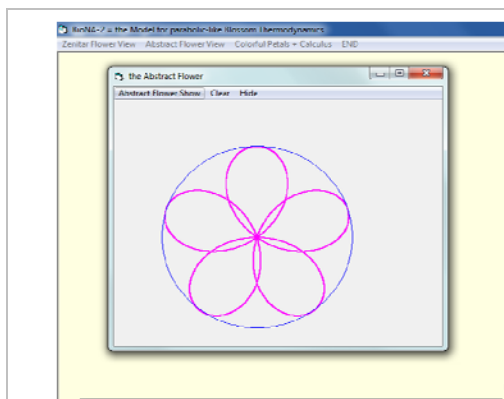


Fig. 7. View of 2D-projection of the 5-petal “abstract” Flower model

**Transparency of the Atmosphere**

Sunny       Mist  
 Sunny Intervals       Thick Clouds  
 Light Clouds

T air, deg. C =

**Reflected Power, mW**

Petal Colours	Reflected Power, mW
<input type="radio"/> White	32.16
<input checked="" type="radio"/> Yellow	21.99
<input type="radio"/> Red	13.59
<input type="radio"/> Blue	14.33
<input type="radio"/> Purple	12.01

Fig. 8. Results of calculations of the irradiation power of the Flower pistil due to reflection from petals of direct sunlight (the results of calculations for all basic colors are indicated). Output values are given in mW

**Results of calculations (numerical experiment)**

Within the framework of given computer model, calculations of the power of solar radiation (direct rays only) reflected from the floral petals of different basic colors were made. The presented model of the flower pistil thermoregulation operates with spectrometric data of radiation and reflection within the range of (300...700) nm. The calculations take into account the standard characteristics of the solar spectrum on the Earth's surface and the spectrum of reflection of the petals of certain colors.

Obtaining of numerical values of the reflected (by means of the Flower corolla) solar radiation power and then drawing the plot of the corresponding function  $T_{pistil} = f(t)$  is the result of a series of numerical experiments within the framework of the author's computer model (see Fig. 9). Here  $T_{pistil}$  is the temperature of the Flower pistil;  $t$  is duration of insolation under certain conditions of atmospheric transparency.

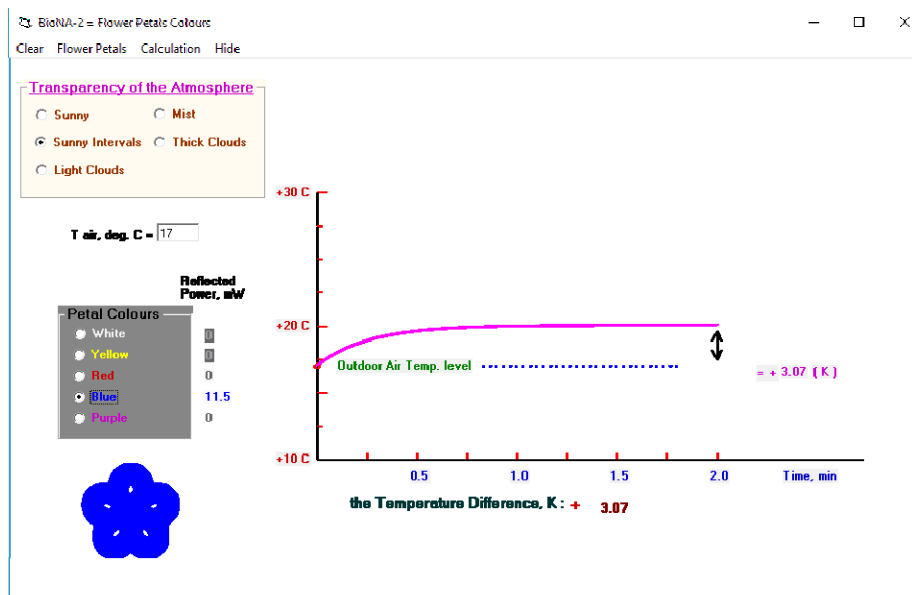


Fig. 9: General view of the display after the sequential working of the program modules “Calculation” and “Flower Petals”

Table 3 displays the relative efficiency of the flower pistil thermoregulation for 5 basic petal pigments: the reflected power for white petals is assumed as 100%. For any weather conditions the following ratio of reflected energy efficiency is kept depending on the color of the flower petals.

Table 3

**The relative efficiency of the flower pistil thermoregulation for 5 basic petal pigments:**

Petal color	a.u.
White	100 %
Yellow	64.8 %
Blue	44.6 %
Red	42.3 %
Purple	37.3 %

Table 4 shows the calculated data of the difference between the temperature  $T_{pistil}$  of the Flower pistil and the ambient air temperature  $T_{air}$  (according to the described mathematical model) under the most transparent atmosphere for the five basic colors of the petals: these calculations were made for each of the colors at temperatures  $5^{\circ}\text{C} \leq T_{air} \leq 25^{\circ}\text{C}$ . The results obtained make it possible to conclude that the Flower of a parabolic shape can effectively stabilize thermally its pistil, since the temperature of the pistil varies very little ( $\Delta T_{pistil} \leq 0.15 \text{ K}$ ) at significant external temperature fluctuations ( $\Delta T_{air} = 20 \text{ K}$ ).

Table 4

**The calculated values of the difference ( $T_{pistil} - T_{air}$ ) between the temperatures of the Flower pistil and the**

**outside air at cloudless weather for the five basic petal colors:**

$T_{air}^{\circ} \rightarrow$	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	$\Delta T_{pistil}$
White	8,0	8,0	7,9	7,9	7,9	0,14
Yellow	5,5	5,4	5,4	5,4	5,4	0,09
Red	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	0,06
Blue	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5	0,06
Purple	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	0,05

**Summary**

As a result of this work, a computer model for the thermoregulation of the pistil of the parabolic form Flower was created. This model is the basis for making appropriate calculations for the thermoregulation of the fruit flower pistil with five petals of various colors, depending on a number of different external and internal factors.

The presented model of a flower pistil thermoregulation “works” with the “abstract” 5-petaled Flower which has a number of quite realistic parameters, such as its shape, the size and the optical properties of the Flower petals, the presence of apertures in the Flower corolla, the size of the Flower pistil and its other physical parameters, and so on.

For this model some accepted simplifications and limitations are also important, for example, the zenithal orientation of the Flower corolla relative to the Sun, allowance for direct sunlight only, the absence of wind, limited spectrum of incident EM radiation ( $\lambda \in [300-700]$  nm), 6 degrees of transparency of the Earth's atmosphere, etc.

One may consider the present work as a development for the previous simplified model of the thermodynamic balance of the pistil of a paraboloid-like flower. The work on improving the mathematical model of the described phenomena led to the following results:

- the given model was corrected for the reflection spectra of the selected five basic colors, and as result the final equation of the temperature balance of the flower pistil was improved [7];
- the differences between the temperature of the Flower pistil and the ambient air temperature were calculated for the five basic petal colors for the various atmospheric transparency states;
- it was found that the petal colors may be both the most and least effective reflectors of radiant energy. It has become apparent that the color of the floral petals is one of the important factors for the successful development and as well survival of plants;
- it was found that with a large change in the ambient temperature ( $\Delta T_{air} = 20^{\circ}\text{C}$ ), the temperature of the pistil varies insignificantly ( $\Delta T_{pistil} \approx 0,2^{\circ}\text{C}$ ), which indicates a high efficiency of thermal protection of the fruit germ is indisputable property of the flowering plant evolution.

The value of the current computer model lies in its applied nature:

- 1) the presented computer model will help to choose scientifically reasonable ways of increasing the fertility of fruit plants during the global climate changing (be it warming or cooling trends), as well as in selecting “new” climatic zones for the propagation of certain plant species;
- 2) information obtained as a result of this numerical experiment can be useful in the application of methods of biotechnology (possibly genetic engineering) to increase the fertility of fruit plants.

**Acknowledgments**

I would like to thank my colleague and partner, Mrs. Nataliya Yevtushenko, for her thoughtful comments and suggestions.

**References**

1. E.D. Bickford, S. Dunn, Lighting for plant growth. London: Kent State University Press, 1972, p. 221.
2. Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life / Eds.: R.C. Worrest, M.M. Caldwell / NATO ASI Series, Series G: Ecological Sciences, Vol. 8, – Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on The Impact of Solar Ultraviolet Radiation upon Terrestrial Ecosystems: I. Agricultural Crops held at Bad Windsheim, Germany, Sept. 27-30, 1983 / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986, p. 374.
3. S.E.J. Arnold, V. Savolainen and L. Chittka, “FReD: The floral reflectance spectra database. Nature Precedings” (2008) / available at: <http://dx.doi.org/10.1038/npre.2008.1846.1>
4. C.J. van der Kooi, J.T.M. Elzenga, M. Staal, D.G. Stavenga, “How to colour a flower: on the optical principles of flower coloration”, Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences, **283** (2016): 20160429, [9 pp.] / available at: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0429>
5. L. Chittka, A. Shmida, N. Troje, R. Menzel, “Ultraviolet as a component of flower reflections, and the colour perception of Hymenoptera”, Vision Res., 1994, 34(11), pp. 1489-1508 / available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8023461>
6. C.J. van der Kooi, “The coloration toolkit of flowers: Filtering pigments, scattering structures and biological significance”, 2015 [Thesis]: University of Groningen, p. 184 / available at: [https://www.rug.nl/research/portal/en/publications/the-coloration-toolkit-of-flowers\(70a15d88-1fc2-4e37-9731-](https://www.rug.nl/research/portal/en/publications/the-coloration-toolkit-of-flowers(70a15d88-1fc2-4e37-9731-)

b7792a404e61).html

7. A.O. Chepok, N.I. Yevtushenko, "Ab initio modeling of Thermodynamics of a fruit tree Flower: the first stage of the Model", International scientific & technical magazine "Measuring and Computing Devices in Technological Processes", – 2017. – №1. – pp. 133-139 / available at: [http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf\\_full/2017/vottp-2017-1.pdf](http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf_full/2017/vottp-2017-1.pdf)

8. Y. Nishiyama, "Five Petals: the Mysterious Number "5" hidden in Nature", International Journal of Pure and Applied Mathematics, 2012, vol. 78, No. 32012, pp. 349-362.

9. K.R. Markham, K.S. Gould, K.G. Ryan, "Cytoplasmic accumulation of flavonoids in flower petals and its relevance to yellow flower colouration", Phytochemistry, 2001, 58 (3), pp. 403-413.

10. R.C. Vergara, A. Torres-Araneda, D.A. Villagra, R.A. Raguso, M.T.K. Arroyo, C.A. Villagra, "Are eavesdroppers multimodal? Sensory exploitation of floral signals by a non-native cockroach *Blatta orientalis*", Current Zoology, 2011, vol. 57 (2), pp.162-174.

11. G. Ne'eman, R. Ne'eman, "Factors determining visual detection distance to real flowers by bumble bees", Journal of Pollination Ecology, 2017, vol. 20 (1), pp 1-12.

12. M. Flaherty, "Do Epidermal Cell Types Have an Effect Upon Ultraviolet Patterns on Flower Petals?", The University of Akron (Ohio, USA), Honors Research Projects (2015), Project #15 / available at: [http://ideaexchange.uakron.edu/honors\\_research\\_projects/15](http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/15)

13. L. Chittka, A. Shmida, N. Troje, R. Menzel, "Ultraviolet as a component of flower reflections, and the colour perception of hymenoptera", Vision Research, 1994, vol. 34 (11), pp. 1489-1508 / available at: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90151-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90151-1)

14. J.B. Marion, General Physics with Bioscience Essays. John Wiley & Sons, 1979, p. 556.

15. F. Kreith, R.F. Boehm, G.D. Raithby, K.G.T. Hollands, N.V. Suryanarayana, et al., Heat and Mass Transfer. The CRC Handbook of Thermal Engineering. – Ed. F. Kreith. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000, p. 1183.

16. M.S. Jayalakshmy, J. Philip, Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature, Int. J. Thermophys. (2010), v. 31, pp. 2295–2304. – DOI 10.1007/s10765-010-0877-7.

17. Global Earth Physics: a Handbook of Physical Constants, Editor: T.J. Ahrens, Publisher: Washington, DC American Geophysical Union, 1995, Physical description vii, 376 p., Series AGU reference shelf Series, vol. 1, ISBN0875908519, Publication Date: 1995.

18. G.P. Smestad, "Optoelectronics of Solar Cells", SPIE Press Monograph Vol. PM115, 2002, pp. 99, – Publisher: SPIE PRESS Bellingham, Washington, USA, SPIE Vol. No.: PM115.

Рецензія/Peer review : 15.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 23.11.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

## Повні вимоги до оформлення рукопису <http://vestnik.ho.com.ua/rules/>

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 3 від 27.11.2018 р.

Підп. до друку 30.11.2018 р. Ум.друк.арк. 39,94 Обл.-вид.арк. 37,99  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу "Вісник Хмельницького національного університету"  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63