

ISSN 2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

1.2015

---

# ВІСНИК

**Хмельницького  
національного  
університету**

Технічні науки  
Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2015, Issue 1, Volume 221

Хмельницький

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

Затверджений як фахове видання  
Наказ МОН 04.07.2014 №793

*Засновано в липні 1997 р.*

*Виходить 6 разів на рік*

---

**Хмельницький, 2015, № 1 (221)**

---

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

Включено до наукометричних баз:

<b>РИНЦ</b>	<a href="http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650">http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650</a>
<b>Google Scholar</b>	<a href="http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ</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>Polish Scholarly Bibliography</b>	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</a>

**Головний редактор**

**Скиба М. Є.**, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, д.т.н., професор, ректор Хмельницького національного університету

**Заступник головного редактора**

**Параска Г. Б.**, д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Хмельницького національного університету

**Відповідальний секретар**

**Гуляєва В. О.**, 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 М.П., д.т.н., Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Гордєєв 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., Камбург В.Г., д.т.н. (Росія), Каплун В.Г., д.т.н., Карван С.А., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коновал В.П., д.т.н., Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія), Костогриз С.Г., д.т.н., Кофанов Ю.М., д.т.н. (Росія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., 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., Пастух І.М., д.т.н., Поморова О.В., д.т.н., Пановко Г.Я., д.т.н. (Росія), Попов В., доктор природничих наук (Німеччина), Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Ройзман В.П., д.т.н., Рудницький В.Б., д.фіз.-мат.н., Сарібеков Г.С., д.т.н., Сілін Р.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатиї Р.В., д.т.н., Сурженко Є.Я., д.т.н. (Росія), Троцишин І.В., д.т.н., Шалапко Ю.І., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Юрков М.К., д.т.н. (Росія), Ясній П.В., д.т.н.

*Технічний редактор*

Горященко К. Л., к.т.н.

*Редактор-коректор*

Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 7 від 29.01.2015 р.**

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

**т** (038-22) 2-51-08

**web:** <http://journals.khnu.km.ua/vestnik>

**e-mail:** [visnyk\\_khnu@rambler.ru](mailto:visnyk_khnu@rambler.ru)

<http://vestnik.ho.com.ua>

[http://lib.khnu.km.ua/visnyk\\_tup.htm](http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm)

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, 2015  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2015

## ЗМІСТ

**МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ**

<b>О.Т. БОГОРОШ, О.П. ГРИГОРЕНКО</b> ПРОФЕСОР В.П. РОЙЗМАН – ЗНАНИЙ ВЧЕНИЙ В УКРАЇНІ І СВІТІ.....	8
<b>О.М. СІНЮК</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	12
<b>Г.М. СОКОЛОВА, І.М. ПАСТУХ</b> ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ МОДИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ В ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ З АВТОНОМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ .....	19
<b>І.Г. ДОБРОТВОР, П.Д. СТУХЛЯК, О.С. ГОЛОТЕНКО</b> МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ В ЕПОКСИКОМПОЗИТ З ВОЛОКНИСТИМ НАПОВНЮВАЧЕМ .....	24
<b>Б.Ф. ПІПА, С.В. МУЗИЧИШИН, О.В. ЧАБАН</b> ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИВОДІВ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ТА АВТОМАТІВ .....	29
<b>Л.Д. ПІТУЛЕЙ, Р.Т. КАРПІК</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ВІБРОАРМОВАНОЇ ЗОНИ ЗУБКІВ ШАРОШОК БУРОВИХ ДОЛІТ .....	33
<b>Т.О. ВАВРИК, Г.І. ЛЕВИЦЬКА, І.Р. МИХАЙЛЮК</b> ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИМАЛЬНОГО ВІДБОРУ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ БУРІННЯ.....	36
<b>Ю.П. ЗАСПА, А.Л. ВОЗНЯК, Ю.І. ШАЛАПКО</b> ВПЛИВ НОМІНАЛЬНО НЕРУХОМИХ ФРИКЦІЙНИХ КОНТАКТІВ НА ЧАСТОТИ ВІБРОАКУСТИЧНОГО ПОЛЯ МАШИНИ ТЕРТЯ.....	43
<b>Ю.П. ЗАСПА, С.Г. КОСТОГРИЗ</b> КАСКАДНИЙ ТРАНСПОРТ ЕНЕРГІЇ ЗБУРЕНЬ В СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОЇ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ.....	47
<b>Д.В. ЛАЗАРЕВА, А.І. ПОТАПЕНКО, Г.Б. ПАРАСКА</b> БІОМЕХАНІКА ЕЛЕМЕНТІВ ЗУБОЦЕЛЕПНОЇ СИСТЕМИ ЗІ ШТУЧНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ.....	53
<b>А.В. ГРУШКО</b> ГОФРООБРАЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕСЕ ІХ ПРОДОЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА.....	59
<b>Л.О. КОВТУН, В.П. РОЙЗМАН, О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА РОБОТУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛАТ РЕА.....	64
<b>С.О. КОШЕЛЬ, Г. В. КОШЕЛЬ</b> СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ .....	72
<b>Р.Е. КОСТЮНИК</b> МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ .....	79
<b>Г.С. РАТУШНЯК, К.В. АНОХІНА</b> МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВТРАТ З БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ В ХОДІ РОЗМІЩЕННЯ ЇЇ В ҐРУНТІ .....	84

## РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

<b>В.М. ЛИСОГОР, А.В. СНІГУР, Д.В. АНТОНЮК</b> МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ШВИДКОДІЇ ІВС ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ СТРИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ .....	89
<b>В.М. ЛИСОГОР, А.В. СНІГУР, Р.М. ВІКУЛОВ</b> КОРИГОВАНІ І НЕКОРИГОВАНІ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ІВС ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ СТРИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ.....	93
<b>В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, Я.О. ОСАДЧУК</b> МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОГО ДІОДА .....	97
<b>О.В. ОСАДЧУК, М.О. ПРИТУЛА, К.О. КОВАЛЬ</b> РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОТРАНЗИСТОРОМ ТА ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ .....	102
<b>А.О. КИЯНИЦЯ, В.В. ІВАНОВА, В.Г. КОЛОБРОДОВ</b> УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОЇ МАТРИЦІ ТА ОБ'ЄКТИВА ТЕПЛОВІЗОРА .....	107
<b>V.V. ROMANUKE</b> OPTIMAL PIXEL-TO-TURN-SCALE STANDARD DEVIATIONS RATIO FOR TRAINING 2-LAYER PERCEPTRON ON TURNED-SCALED OBJECTS WITH DISTRIBUTION-CONSISTENT FEATURE DISTORTION IN CLASSIFYING TURNED-SCALED OBJECTS.....	112
<b>А.А. ЯРОВИЙ, С.Г. КАШУБІН, О.О. КУЛИК, І.М. ЛИПКАНЬ</b> РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІЧНИХ МІКРОВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ TIME DELAY NEURAL NETWORK .....	122
<b>В.М. ЛИСОГОР, А.В. СНІГУР, Р.М. ВІКУЛОВ</b> АДАПТИВНЕ ОПРАЦЮВАННЯ СТРИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ .....	127
<b>О.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, М.В. ЄВСЄЄВА</b> ЄМНІСНІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ СТИБІЙ АБО БІСМУТВМІСНИХ ДІОКСИМАТІВ НІКОЛУ (II).....	131
<b>Н.В. ХРУЛЕВ</b> СТРУКТУРА МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНДУКТОСИНА.....	136
<b>О.О. ЛАЗАРЄВ, М.А. ФЛІНІЮК, Л.Б. ЛІЩИНСЬКА, Д.В. БОНДАРЮК</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ L-НЕГАТРОНІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ТА СТІЙКІСТЬ ІНДУКТИВНИХ СЕНСОРІВ .....	140
<b>Ю.М. БОЙКО, Р.Ю. НОЧКА</b> ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗАСОБІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ .....	144
<b>М.В. ЧИЧУЖКО</b> ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ВИБОРУ НАЙПРИДАТНІШОГО СУПЕРВІЗОРА ЖИВЛЕННЯ.....	156
<b>В.С. ОСАДЧУК, Ю.С. КРАВЧЕНКО, В.І. КОЛОМІЄЦЬ, І.О. ЧЕХІВСЬКИЙ</b> ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА РОБОТУ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ. Ч.1. ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕКОМБІНАЦІЙНІ ВТРАТИ В АКТИВНІЙ І ПАСИВНІЙ БАЗІ.....	159
<b>В.А. ЛУКАШЕНКО, А.Г. ЛУКАШЕНКО, В.М. СПІВАК</b> СИСТЕМАТИЗАЦІЯ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ СОПРОЦЕСОРІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ, ПРЕЦИЗІЙНИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ .....	164



<b>М.М. КАСЯНЧУК, І.З. ЯКИМЕНКО, І.Р. ПАЗДРІЙ, Я.М. НИКОЛАЙЧУК</b> АНАЛІТИЧНИЙ ПОШУК МОДУЛІВ ДОСКОНАЛОЇ ФОРМИ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В КИТАЙСЬКІЙ ТЕОРЕМІ ПРО ЗАЛИШКИ.....	170
<b>A.S. LYAPANDRA</b> LOAD BALANCING OF RECONFIGURABLE CLUSTER SYSTEM.....	177
<b>А.Я. МУШАК</b> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУ ON-LINE ПРОДАЖІВ В ЕЛЕКТРОННИХ МАГАЗИНАХ.....	181
<b>О.М. КУЦЕВОЛ</b> МЕТОД КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ЗВ'ЯЗАНОЇ ВОЛОГИ В КАПЛІЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛАХ.....	186
<b>Ж.В. СОТУЛА, К.В. БАЗІЛО, В.В. ТУЗ</b> П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ РОБОТЕХНІКИ.....	190
<b>В.Т. КОНДРАТОВ, А.А. КОРОГОД</b> ИЗБЫТОЧНАЯ ПИРОМЕТРИЯ: ИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЛОГАРИФИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА.....	193
<b>І.С. ПЯТІН, В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА</b> КОНФІДЕНЦІЙНА СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ.....	207
<b>О.Б. ГОЛЕВИЧ, О.С. ПИВОВАР</b> МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАТ ІЗ ВБУДОВАНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОСМУГОВИХ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	213
<b>В.О. ВАРЕШКО</b> О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ШКАЛЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ МНОГОЗНАЧНЫХ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ МЕР С НЕОДИНАКОВЫМИ РАЗМЕРАМИ КВАНТОВ.....	217
<b>ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ</b>	
<b>О.В. НАХАЙЧУК, Е.А. ЗАХАРОВА, В.П. ЯКУБОВИЧ</b> РОЗРОБКА КОМПЛЕКТУ СПЕЦОДЯГУ ВІД ПРОМИСЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДЛЯ ЗАПРАВНИКІВ АЗС.....	221
<b>В.А. ОТРОШКО, О.Р. МОКРОУСОВА, Н.В. МЕРЕЖКО</b> ВПЛИВ ПОЛІМЕРНО-МІНЕРАЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ НА ТЕМПЕРАТУРОСТІЙКІСТЬ КОЛАГЕНУ.....	225
<b>О.Я. СЕМЕШКО, Л.В. ПЕЛЫК</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО БЕЛЕНИЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНИ В КИСЛОЙ СРЕДЕ.....	232
<b>Г.В. МІЩЕНКО, Д.С. КАЧУК, В.В. НАЗАРОВА</b> ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОФОБІЗАЦІЇ ТКАНИН З ПІГМЕНТОВАНИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ПЛІВКАМИ НА ПОВЕРХНІ.....	237
<b>О.В. СКІДАН, Т.А. НАДОПТА, А.Б. ДОМБРОВСЬКИЙ</b> ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО КОМПОЗИЦІЙНО-КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ВЗУТТЯ ДЛЯ ДІТЕЙ-ШКОЛЯРІВ.....	244
<b>Н.Б. ХЛЄБНІКОВА, Н.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, А.Г. ДАНИЛКОВИЧ</b> КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ХУТРИЯНОГО ВЕЛЮРУ ЗІ ШКУРОК НУТРИЇ.....	249
<b>Г.О. ПУШКАР, Б.Д. СЕМАК</b> ЛЬОН В ІНТЕР'ЄРІ.....	256

---

<b>О.М. МИРОШНИК</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА EVOMAX В ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ХИМИЧЕСКИХ АВАРИЙ	263
<b>Н.І. ДОМАНЦЕВИЧ, О.В. ШУНЬКІНА, Б.П. ЯЦИШИН</b> ВПЛИВ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ НА ЗМІНУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ДЕФЕКТНІСТЬ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ.....	269
<b>Р.В. КАЧАН, О.А. АНДРЕЄВА, А.П. СТРОКАНЬ</b> СТВОРЕННЯ СУЧАСНОГО ВІТЧИЗНЯНОГО ФУНГІЦИДНОГО ПРЕПАРАТУ .....	274
<b>Н.В. САДРЕТДІНОВА, С.М. БЕРЕЗНЕНКО, К.Ф. КУШНІР</b> СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ОДЯГУ ПРОФІЛАКТИЧНО-ЛІКУВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	277



УДК 621.787

О.Т. БОГОРОШ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

О.П. ГРИГОРЕНКО

Хмельницький національний університет

**ПРОФЕСОР В.П. РОЙЗМАН – ЗНАНИЙ ВЧЕНИЙ В УКРАЇНІ І СВІТІ**

*Стаття присвячена 80-річному ювілею Заслуженого діяча науки і техніки України, віце-президента Національної ради України з машинознавства, доктора технічних наук, професора Ройзмана Вілена Петровича.*

А.Т. BOGOROSH

National Technical University "Kiev Polytechnic Institute"

О.Р. HRYHORENKO

Khmelnytsky National University

**PROFESSOR ROIZMAN - KNOWN SCIENTIST IN UKRAINE AND WORLD**

*The article is devoted to the 80th anniversary of the honoured worker of a science and technics of ukraine, vice-president of the national council of ukraine of engineering, doctor of technical sciences, professor roizman vilen petrovich.*



Вілен Петрович Ройзман народився 31 березня 1935 р. в селищі міського типу Летичів, Кам'янець-Подільської області УРСР, в родині службовців.

Велику вітчизняну війну сім'я зустріла на прикордонній заставі в с. Великі Мости, Львівської області, де служив його батько. Потім була евакуація в с. Воскресенське Саратовської обл. (Росія) і повернення в 1943 р. спочатку в Київ, а потім в Проскурів. Батько В.П. Ройзмана в 1942 р. загинув під Ленінградом.

З 1944 по 1952 р. Вілен Петрович навчався в Хмельницькій школі № 6, а з 1953 по 1958 р. – у Харківському авіаційному інституті, після закінчення якого отримав диплом інженера-механіка з авіадвигунобудування. Ще, будучи студентом ХАІ, Вілен Петрович мріяв займатися ракетними двигунами і прагнув на практику в Воронежське ОКБ, але цей шлях виявився для нього закритим. Тоді в дипломному проекті він розробив атомний двигун для надзвукового літака, який міг довгий час перебувати в повітрі і облітати земну кулю. Однак з появою міжконтинентальних балістичних ракет потреба в таких літаках відпала.

Після закінчення Харківського авіаційного інституту Вілен Петрович був направлений в Запорізьке ОКБ-478, яке

займався створенням авіаційних двигунів, і яким керував тоді видатний конструктор академік Олександр Георгійович Івченко. Молодий інженер просився на льотну роботу, пов'язану з випробуваннями двигунів на літаку, але його призначили у наукову лабораторію міцності, що виявилось не менш цікавим і було пов'язане з польотними експериментами. У цей час вельми серйозною була проблема підвищених вібрацій основного двигуна АІ-20 та іншого високооборотного реактивного двигуна АІ-7, який монтувався на кінці лопаті вертольота.

Робота захопила Вілена Петровича, і він зайнявся пошуком причин підвищених вібрацій роторів цих двигунів. Він почав з вивчення книги всесвітньо відомого українського вченого Степана Прокоповича Тимошенко «Коливання в інженерній справі». Особливий інтерес викликав написаний дрібним шрифтом параграф, де були викладені міркування про можливий вплив деформування ротора на його коливання. І взявши цей матеріал за основу, Вілен Петрович розвинув ідею С.П. Тимошенко, і, розглядаючи умови

відсутності вібрацій на експлуатаційних частотах обертання ротора двигуна AI-7 40000 об/хв, прийшов до дивного тоді висновку про можливість не відсутності дисбалансів, а наявності певної залежності між дисбалансами ступенів компресора і турбіни. Пізніше з'ясувалося, що ця залежність відображала так звану умову ортогональності форм коливань і призвела до способу балансування гнучких роторів за їх відповідністю формам вигину. Отримані В.П. Ройзманом теоретичним шляхом результати збіглися з експериментальними, отриманими М.С. Левітом в Московському авіаційному інституті. Подальші дослідження проводилися ними спільно, і М.С. Левіт став науковим керівником, а пізніше і другом В.П. Ройзмана на довгі роки. Спільними зусиллями тоді були створені перші в світі вакуумні стенди для дослідження динаміки і балансування роторів лопаткових машин, зокрема авіадвигунів, проведені дослідження та успішні балансування роторів компресорів двигунів конструкції А.М. Люльки, Н.Д. Кузнецова і О.Г. Івченка. Налагодити випуск таких стендів в СРСР за різних бюрократичних причин тоді не вдалося, зате пізніше це зробила німецька фірма "Шенк", яка й донині поставляє таке обладнання в різні країни світу.

Розвиваючи розпочаті теоретичні дослідження, В.П. Ройзман розробив свою теорію і кілька нових оригінальних методів балансування пружно-деформівних роторів і підтвердив їх ефективність експериментально на вакуумних стендах, а потім і під час випробувань різних авіадвигунів. Все це склало зміст закритої кандидатської дисертації, захищеної через 2 роки в 1964 р. в Центральному науково-дослідному інституті авіаційного моторобудування (ЦІАМ), а ще пізніше в 1970 р. спільно з М.С. Левітом дозволило видати книгу «Вібрації і зрівноваження роторів авіадвигунів».

З часом Вілен Петрович вивчив й інші праці С.П. Тимошенка, і вони стали для нього взірцем поєднання науки з практикою, а сам С.П. Тимошенко – еталоном вченого, інженера-механіка. Між іншим, Вілен Петрович зберігає бібліографічну цінність – підручник С.П. Тимошенка «Курс опору матеріалів», написаний ним у 1911 році на підставі лекцій у Київському політехнічному інституті в 1908–1910 роках.

Роки роботи в ОКБ, тепер ЗМКБ «Прогрес» ім. О.Г. Івченка, Вілен Петрович згадує як одні з найбільш значних у своєму житті. Тут він навчився поєднувати науку з практикою, подружився з видатними вченими та інженерами того часу і все-таки здійснив свою мрію про льотну роботу, виконуючи експерименти разом з видатними льотчиками того часу (брати Кокінакі, Степанов, Терещенко). Одна з таких робіт наведена нижче.

В процесі експлуатації турбогвинтових двигунів AI-20 на літаках ІЛ-18, АН-10, АН-12, двигунів AI-24 на літаках АН-24, АН-26, АН-30, двигунів НК-12 на літаках ТУ-114, ТУ-95 мали місце поломки вала повітряного гвинта і обриви лопатей гвинта. Якщо відірвана частина лопаті відлітала повз літака, двигун вдавалося флюгерувати і вимкнути, а літак посадити. Якщо ж відірваний шматок лопаті потрапляв у фюзеляж літака і пробивав його, то наступала розгерметизація, ушкоджувалися тяги управління або відбувалися інші ушкодження, і літак, як правило, розбивався. Такі катастрофи сталися з літаками АН-24, АН-12, ТУ-114. Збільшення товщини вала гвинта без з'ясування причин дефекту призводило лише до того, що цей дефект проявлявся пізніше або ще до цього виходила з ладу інша слабка деталь кінематичного ланцюга редуктора двигуна. Так тривало кілька років.

В.П. Ройзман наполіг і провів льотні випробування, в ході яких синхронно фіксувалися коливання лопатей і напружень у валу гвинта. І вже під час пробігу землею у злітному режимі під час просідання амортизаторів шасі, а потім у польоті під час бовтанки літака і його ковзань на розворотах були зафіксовані неприпустимо великі коливання лопатей повітряного гвинта і відповідні їм напруги у валу гвинта. Пізніше Вілен Петрович теоретично описав побачену картину. Він показав, що під час всіх рухів літака, перпендикулярних до напрямку польоту, що збігається з напрямком його поздовжньої центральної осі (тобто в разі бовтанки, ковзання, зльоту, посадки), потік, що набігає на повітряний гвинт, викликає одне повне коливання кожної з лопатей гвинта. А якщо власна частота коливання лопаті збігається або близька до частоти обертання гвинта, то настає явище резонансу, амплітуди цих коливань сильно зростають і зрештою через явище втоми призводять до поломок лопаті або іншого елемента кінематичного ланцюга. Подальша перевірка показала, що багато екземплярів лопатей якраз і мають такі значення власних частот коливань. А так як під час створення повітряних гвинтів використовувався принцип подібності, то не дивно, що один і той же дефект мав місце на різних літаках і повітряних гвинтах.

Незважаючи на те, що дефект був розкритий, і його причини були пояснені всім, навіть військпредам, написаний відповідний звіт про роботу, публікація або просто оприлюднення цієї інформації були заборонені, і Віленові Петровичу пояснили цю заборону так: «Ви що хочете, зупинити польоти всього парку турбогвинтових літаків? Так, у нас тільки на маршруті Москва–Сочі літаки ІЛ-18 виконують 18 рейсів на день! Розробники повітряних гвинтів не зможуть швидко переробити лопаті і переоснастити ними всі літаки. Так що поки мовчати!». І літаки продовжували літати і, на жаль, падати теж.

Інший епізод з життя того часу. Під час відрядження в ЦІАМ, і виконуючи там роботу з доведення ротора компресора двигуна AI-20, Вілена Петровича залучили до проведення вібраційних випробувань крісла першого космонавта Ю.А. Гагаріна. У лабораторію доставили крісло з лежачим у ньому макетом космонавта. В ході випробувань було проведено налагодження жорсткостей крісла і його кріплень від можливих в польоті резонансних коливань, і далі в першому польоті жодних ускладнень не виникло. Так Вілен Петрович доторкнувся до космонавтики – справи, якою мріяв займатися зі студентської лави.

У 70-х рр. В.П. Ройзман перейшов на роботу в щойно організоване Хмельницьке вище

артилерійське командне училище. Він повернувся в рідне місто і з ентузіазмом взявся за створення кафедри опору матеріалів і деталей машин, не забуваючи про наукову роботу і не втрачаючи зв'язків з вченими та інженерами авіаційної промисловості. На новій роботі з'явилися і нові колеги-друзі: генерали В.Я. Кульов, Б.Ф. Боков, А.М. Івасик і Командувач ракетними військами і артилерією сухопутних військ маршал артилерії Г.Є. Передельський.

Вілен Петрович виявився вимогливим, але справедливим викладачем опору матеріалів. Йому важливо було, щоб студенти показали здатність розібратися в питаннях і завданнях, користуючись, як інженери, підручними матеріалами: конспектами і книжками. Багато хто з його колишніх курсантів стали генералами, полковниками, вже закінчили службу в армії і завжди під час зустрічей демонструють свою повагу і любов до суворого професора.

Наприклад, знання, отримані з курсу опору матеріалів, дуже знадобилися в його службі колишньому курсанту, майору-десантнику. Справа була під час війни в Афганістані, де на наші війська напали душмани, що переховувались на території Ірану. Наші десантники на вертольотах здійснювали туди рейди для розгрому їх баз, руйнування будівель, мостів, техніки і т.д. Тоді і знадобилися знання опору матеріалів, але не для того, щоб будувати, а для того, щоб руйнувати. Так як вертоліт міг брати обмежену кількість вибухівки, то потрібно було знати ті місця мостів, будівель, машин, куди слід було закладати мінімальну кількість вибухівки для досягнення найбільшого руйнівного ефекту.

Поряд з навчально-виховною та методичною роботою В.П. Ройзман не забуває про науку. Він закладає новий науковий напрям, розглядаючи балансування гнучких роторних систем як задачу їх ідентифікації і плідно застосовує цей підхід до балансування швидкохідного турбоагрегату ТНА-150, повітряних гвинтів літаків та інших об'єктів. У ході досліджень на реальних газотурбінних двигунах і пральних машинах він відкриває ефект прослизання в підшипниках кочення і вперше в світі доводить, що цей дефект виникає внаслідок їх недовантаження, що виводить їх з ладу так само, як і перевантаження, та створює оригінальні методи вивчення цього явища та боротьби з ним.

Разом з іншими провідними вченими СРСР в 1975 р. В.П. Ройзман видає двотомну монографію «Основи балансування техніки», яка в той час була енциклопедичним посібником, а в 1979 році в Інституті машинознавства Академії наук СРСР успішно захищає докторську дисертацію під назвою «Ідентифікація та балансування гнучких роторних систем», і ще через рік йому присвоюють звання професора.

В цей же час його залучають до робіт з усунення потужнісних дефектів радіоелектронних систем, що експлуатуються в екстремальних умовах на ракетах, швидкісних літаках, кораблях, і він очолює дослідження на замовлення провідних підприємств СРСР і НДІ: ЦНПТІ, Позитрон, Авангард, Новатор, Гіріконд, Катіон та ін. Тоді це були піонерські закриті роботи і ними фактично відкривався новий науковий напрям.

Досвід і знання, набуті В.П. Ройзманом під час роботи в ЗМКБ «Прогрес» ім. А.Г. Івченко, були перенесені в абсолютно іншу галузь науки і техніки та виявилися дуже доречними. Він знав, що, якщо промисловість і НДІ просять сьогодні розібратися в якійсь невіршеній проблемі, значить її вирішення їм було потрібно вчора, тому намагався в найкоротші терміни розібратися в задачі і знайти прийнятне для швидкого впровадження в заводську практику розв'язання.

Зайнявшись цією новою проблемою, В.П. Ройзман з'ясовує, що більшість інженерів і вчених електронників не володіють елементарними знаннями теоретичної механіки та опору матеріалів і тому не знають методів боротьби з потужнісними дефектами. А причина цього виявилася в тому, що на радіотехнічних факультетах чомусь скасували вивчення цих предметів, вся увага приділялася схемотехніці, а технологія виробництва виробів радіоелектроніки була на другому плані, хоча нею багато в чому визначалася і міцність. Потужнісних проблем було небагато поки виробі радіоелектроніки експлуатувалися в тепличних умовах, але як тільки їх стали застосовувати на літаках, ракетах, підводних човнах та інших виробках в умовах роботи з температурою від  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ , вібраціями з частотою 5–2000 герц і перевантаженнями до 150 g, атмосферним тиском в межах  $6,6 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^5$  ПА, умовах радіації, вологості та ін. Кількість відмов через механічні впливи стала значною і проблема забезпечення міцності таких виробів стала в один ряд з радіоелектронними проблемами. Один з прикладів сумних наслідків незнання електронниками механіки наведено нижче.

У СРСР, років за 15 до того, як це було зроблено на Заході, з'явилися перші зразки високоточної зброї, тієї самої, яку пізніше застосували американці проти Югославії та Іраку, а Ізраїль – для ударів з повітря по автомобілях, в яких знаходилися ватажки терористів. На одному з підприємств були створені лазерні установки для відпрацювання систем наведення ракет цієї зброї. Чим тонші, гостріші були промені лазера, що посилався і відбивався від об'єкта, тим точнішою була зброя. Але довгий час не вдавалося отримати необхідної точності через те, що промені були розмитими і повільно відповзали від встановленого положення. В.П. Ройзману досить швидко вдалося розібратися в причинах цього явища. Воно відбувалося через те, що конструкція пристрою з точки зору механіки була спроектована неграмотно, вона виявилася так званою статично-невизначеною, в елементах якої під час зміни температури виникали температурні напруження і пов'язане з ними жолоблення конструкції, яке і відхиляло промінь від місця наведення. Крім того, ротор розгортки у вигляді шестигранної дзеркальної призми не був відбалансованим і працював поблизу резонансних частот, а це породжувало вібрації всієї системи і призводило до розмиття променя лазера. Після усунення зазначених недоліків точність зброї істотно підвищилася. Втім, з початком

перебудови ці роботи на якийсь час були забуті і американці обійшли СРСР і Росію.

Міністерства радіоелектронної, авіаційної промисловості, середнього та загального машинобудування, а також Міністерство оборони не шкодували грошей на наукові дослідження, і у Вілена Петровича утворилися наукові колективи, які переросли потім у школи з динаміки роторних систем і механіки в електроніці. Йому вдалося зібрати навколо себе виключно здатних за своїми спеціальностями людей, які тепер працюють в США: математика Л.Д. Вайнгортіна, експериментатора М.І. Хавкіна, програміста Р.В. Гудіча, а тоді вони були серцевиною цих шкіл. Завдяки такому підбору кадрів вдавалося спільно вирішувати найрізноманітніші наукові проблеми.

Одним з основних замовників робіт був Центральний науково-дослідний радіотехнічний інститут (ЦНІРТИ) в Москві, в якому працювало 14 академіків АН СРСР (в Україні їх було 5), 26 Лауреатів Ленінської премії. Працював у ньому тоді відомий вчений, академік, адмірал Л.І. Берг, який познайомившись з деякими з робіт, сказав Віленові Петровичу: «Та Ви у нас переворот зробите!» І звернувся з листом до колишнього Міністра вищої освіти СРСР Елютіна О.В. з настійним проханням про відновлення вивчення механіки під час підготовки інженерів-електронників.

Дослідні роботи тривали аж до розпаду Радянського Союзу, а після розпаду – в інтересах підприємств України, хоча в значно меншому обсязі і практично без фінансування. За 35 років досліджень в галузі радіоелектроніки було виконано близько 250 наукових робіт. Тільки їх перелік зайняв би кілька сторінок. За матеріалами цих досліджень під керівництвом В.П. Ройзмана захищено три докторські і дев'ять кандидатських дисертацій.

Вирішуючи багато практичних завдань в області динаміки і міцності структурно складних механічних систем, В.П. Ройзман і його учні зробили ряд теоретичних узагальнень і сформулювали постановку і вирішення декількох важливих наукових проблем.

З 1987 року до теперішнього часу робота В.П. Ройзмана пов'язана з Хмельницьким національним університетом на посаді завідувача кафедри (опору матеріалів і теоретичної механіки ХТІБО, прикладної механіки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій, радіотехніки та зв'язку). Під керівництвом Вілена Петровича постійно ведеться держбюджетна наукова робота, в якій приймають участь не тільки викладачі, а й аспіранти та студенти. На сьогоднішній день В.П. Ройзман входить в спеціалізовані ради з захисту докторських і кандидатських дисертацій ХНУ.

Вілен Петрович – провідний вчений України в галузях балансувальної техніки і потужнісної надійності в радіоелектроніці. Вже не один рік під його керівництвом здійснюється реалізація цілої низки міжнародних наукових проектів.

В.П. Ройзман неодноразово представляв Хмельницький національний університет і Україну в цілому, виступаючи з науковими доповідями на всесвітніх форумах у Франції, США, Бразилії, Італії, Ізраїлі та інших країнах. Вілен Петрович є керівником однієї з наукових шкіл Хмельницького національного університету «Динаміка і міцність машин, приладів та радіоелектронної апаратури». У цій галузі проводяться дослідження динаміки складних технічних об'єктів, починаючи від авіаційних двигунів до пральних машин і виробів електронної техніки, розробляються методи ідентифікації, балансування та автобалансування роторів, які швидко обертаються, в тому числі таких, що мають змінний баланс, розробляються методи та засоби неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування міцності різних об'єктів, захисту радіоелектронної апаратури від механічних впливів.

За свої наукові досягнення, багаторічне формування інтелектуального потенціалу нашого краю та країни Вілен Петрович нещодавно був нагороджений єдиним в Україні дипломом Міжнародного Алфьоровського фонду підтримки освіти та науки, який був заснований у 2001 році лауреатом Нобелівської премії Ж. Алфьоровим з метою об'єднання інтелектуальних, фінансових і організаційних зусиль науковців для сприяння розвитку науки та освіти. В 1991р. В.П. Ройзману президентом України було присвоєно звання «Заслужений діяч науки і техніки України». Він є дійним членом Академії інформатизації.

Колектив Хмельницького національного університету щиро вітає Вілена Петровича з цими досягненнями та 80-річним ювілеєм і бажає йому подальших творчих здобутків у науково-дослідній роботі!

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Запропонована математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів, що встановлює взаємозв'язок між основними в'язкопружними параметрами полімеру. Отримано вираз для середньої деформації полімерного матеріалу, який дозволяє за відомими фізико-механічними властивостями полімеру передбачити мінімальні значення технологічних деформацій розтягу матеріалу, які необхідно створити в переробному пристрої, щоб почався процес руйнування структури полімеру.

Ключові слова: переробка, полімер, структура, релаксація, напруження, деформація, тензор.

O.M. SYNYUK

Khmelnytskyi National University

### MATHEMATICAL MODEL OF ANISOTROPIC PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS

The mathematical model of anisotropic properties of polymeric materials was proposed in the article. It establishes the relationship between the main viscoelastic parameters of polymer. An expression for the average deformation of the polymer material was received. It allows by the known physical and mechanical properties of the polymer to provide minimum values of deformation of material tensile which must be created in a technological device to began the process of polymer structure destroying.

Key words: recycling, polymer structure, relaxation, stress, strain, tensor.

**Вступ.** Запропонована в роботі [1] модель для опису механічних властивостей природних та штучних полімерів в орієнтованому і неорієнтованому стані передбачає, що структура природних та штучних полімерів в орієнтованому і неорієнтованому стані моделюється дво- або багатоелементним шаруватим композиційним середовищем, при цьому вважають, що у першому наближенні неорієнтований полімер можна розглядати як систему анізотропних пружних елементів з такими ж пружними властивостями, як і у високоорієнтованого. Середні значення модулів пружності системи визначаються або на основі припущення про однорідність розподілу напружень у системі або на основі припущення про однорідність деформації.

У багатоелементному шаруватому композиційному середовищі шари можуть бути повернені один відносно іншого на різні кути. Полімерні матеріали в результаті технологій виготовлення є анізотропними і процес їх деформації може бути описаний лінійною теорією в'язкопружності, яка в інтегральній формі має наступний вигляд [2].

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}(t) &= \int_0^t E_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau, \\ \varepsilon_{ij}(t) &= \int_0^t J_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\sigma_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $\tau$  – час релаксації;  $E_{ijkl}, J_{ijkl}$  – відповідно функції релаксації і повзучості, які утворюють тензори четвертого порядку.

При  $-\infty < t < 0$  тензори  $E_{ijkl}, J_{ijkl}$  дорівнюють нулю, тобто  $E_{ijkl}(t) = J_{ijkl}(t) = 0$ , і кожен елемент цих тензорів має обмежену варіацію в будь-якому замкнутому підінтервалі з області  $-\infty < t < \infty$ .

**Основна частина.** Скористаємося виразом узагальненого закону Гука [3, 4] у в'язкопружній постановці для анізотропних матеріалів

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3,\tag{2}$$

де  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{kl}$  – відповідно тензори напруження і деформації другого рангу відповідно;  $C_{ijkl}$  – тензор коефіцієнтів четвертого рангу, що описують пружні властивості полімерних матеріалів. Два однакові індекси позначатимуть нормальні напруження, а два різні індекси позначатимуть дотичні напруження. Причому цифра 1 позначає вісь X або повернену вісь X', цифра 2 – вісь Y або повернену вісь Y', цифра 3 – вісь Z або повернену вісь Z':

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}\tag{3}$$

Аналогічно з відносними деформаціями розумітимемо, що якщо  $k = l$ , то  $\varepsilon_{kl}$  представляють відносні деформації (подовження бо укорочення), а якщо  $k \neq l$ , то  $\varepsilon_{kl}$  представляють відносні деформації зсуву. При цьому слід мати на увазі, що у формулі (2) підсумовування проводиться за індексами, що зустрічаються двічі в правій частині формули, тобто за індексами  $k$  і  $l$ . Для обчислення всього напруженого



стану анізотропного тіла в загальному випадку буде потрібно  $3^4 = 81$  значення релаксаційних постійних. Проте симетричність тензорів  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{kl}$  дозволяє зменшити кількість незалежних компонент до 36.

Вирішуючи рівняння (2) відносно деформації  $\varepsilon_{kl}$ , отримаємо вираз закону Гука у в'язкопружній постановці у вигляді:

$$\varepsilon_{kl} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (4)$$

де  $S_{ijkl} = \frac{1}{C_{ijkl}} = C_{ijkl}^{-1}$  – тензор податливостей (або тензор коефіцієнтів, що описують в'язкопружні властивості полімерів).

При цьому згідно до [3] величину в'язкопружного потенціалу можна представити у вигляді квадратичної функції напруження:

$$U = \frac{1}{2} \cdot S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij} \cdot \sigma_{kl}. \quad (5)$$

У [3–6] показано, що величина в'язкопружного потенціалу  $U$  різна для різних напружених станів, але постійна (інваріантна) для кожного даного напруженого стану і не залежить від повороту осей координат. Умова інваріантності величини в'язкопружного потенціалу від повороту координатних осей для конкретного виду напруженого стану лежить в основі визначення релаксаційних властивостей полімерних матеріалів. При цьому в процесі формування полімерних матеріалів згідно до моделі, що представлена в роботі [1], можливе чергування різних шарів, що володіють різними фізико-механічними властивостями і різними типами симетрії їх релаксаційних властивостей. Для опису в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів необхідно мати в своєму розпорядженні рівняння, що встановлюють взаємозв'язок їх релаксаційних властивостей з типами їх анізотропії, тобто з типами їх структурної симетрії [7]. Для отримання основних визначальних співвідношень, що зв'язують різні типи структурної анізотропії текстильних матеріалів, при утворенні шарів, розглянемо тензор пружних постійних  $\chi_{ijkl}$  в компактнішому вигляді, при умові введення таких скорочених позначень для напружень і деформацій:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_1, & \varepsilon_{11} &= \varepsilon_1; \\ \sigma_{22} &= \sigma_2, & \varepsilon_{22} &= \varepsilon_2; \\ \sigma_{33} &= \sigma_3, & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_3; \\ \sigma_{23} &= \sigma_4, & \varepsilon_{23} &= \varepsilon_4; \\ \sigma_{13} &= \sigma_5, & \varepsilon_{13} &= \varepsilon_5; \\ \sigma_{12} &= \sigma_6, & \varepsilon_{12} &= \varepsilon_6. \end{aligned} \quad (6)$$

Виконуючи заміну компонентів тензорів напружень та деформацій в рівнянні (2), враховуючи їх симетричність, отримаємо:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad \sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (7)$$

Згідно з [4] матриця  $C_{ij}$  є симетричною відносно головної діагоналі. Це означає, що в рівнянні (7) коефіцієнти, що розташовані над головною діагоналлю і під нею, будуть попарно рівними між собою. В результаті лишиться 21 коефіцієнт, які розрізняються між собою:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Нехай полімер володіє по відношенню до своїх в'язкопружних властивостей віссю симетрії другого порядку [4]. Це означає, що після кожного повороту системи координат на  $180^\circ$  навколо осі симетрії значення в'язкопружних постійних в нерухомій і рухомій системі координат мають співпадати. Це дає рівність нулю таких компонентів матриці  $C_{ij}$ :

$$C_{14} = C_{24} = C_{34} = C_{15} = C_{25} = C_{35} = C_{46} = C_{56} = 0. \quad (9)$$

Підставляючи рівняння (9) в рівняння (8) отримаємо матрицю  $C_{ij}$ , яка має 13 незалежних

КОМПОНЕНТ:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ & & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для випадку ортотропної полімерного матеріалу по відношенню до трьох взаємоперпендикулярних площин матриця  $C_{ij}$  буде мати 9 незалежних компонент [4]. Згідно з [7] ортотропне тіло можна представити як призму, що містить решітку з трьох взаємно перпендикулярних “стрижнів” різних розмірів та розташованих вздовж координатних осей  $x$ ,  $y$  та  $z$ , як показано на рис. 1.

Подібне уявлення ортотропного континууму, звичайно, умовно; воно служить лише зручною формою для наочного представлення матеріалу, який має різні пружні властивості в різних напрямках. З рис. 1 видно, що ортотропне тіло буде по-різному реагувати на вплив нормальних і дотичних зусиль, прикладених до різних граней призми – до граней з нормальними уздовж координатних осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Наприклад, деформація  $e_{zz}$ , пов'язана з напруженням  $\sigma_{zz}$ , буде помітно меншою за деформацію  $e_{xx}$ , що пов'язана з напруженням  $\sigma_{xx}$ . Аналогічно деформації зсуву  $e_{yz}$ , викликані дотичними напруженнями  $\sigma_{yz}$ , будуть менші, ніж деформації зсуву  $e_{xy}$ , викликані дотичними напруженнями  $\sigma_{xy}$ .

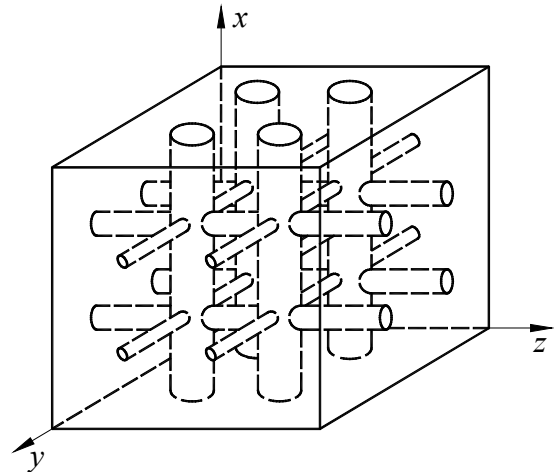


Рис. 1. Ортотропний матеріал

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Трансверсально ізотропний матеріал можна представити таким же способом, як ортотропний, за тим винятком, що взаємно перпендикулярна сітка стрижнів у двох координатних напрямках ( $y$  та  $z$ ) має однакові розміри [7]. Це показано на рис. 2, з якого видно, що напрями  $x$  і  $y$  еквівалентні.

Така еквівалентність дозволяє описати трансверсально ізотропний матеріал за допомогою п'яти постійних замість дев'яти, необхідних для ортотропного.

Так як маємо ізотропність властивостей матеріалу по координатах  $y$  та  $z$ , то коефіцієнт, що стоїть перед  $\varepsilon_2(\varepsilon_y)$  в другому рівнянні системи (10), дорівнює коефіцієнту, що стоїть перед  $\varepsilon_3(\varepsilon_z)$  в третьому рівнянні даної системи, а коефіцієнт, що стоїть перед  $\varepsilon_2(\varepsilon_y)$  в першому рівнянні системи (10), дорівнює коефіцієнту, що стоїть перед  $\varepsilon_3(\varepsilon_z)$  в третьому рівнянні цієї системи, тобто  $C_{22} = C_{33}$ , а  $C_{12} = C_{13}$ .

Крім того, зсув в ізотропній площині  $y, z$  забезпечує певне співвідношення між постійними при  $\varepsilon_2(\varepsilon_{yy})$ ,  $\varepsilon_3(\varepsilon_{zz})$  в другому рівнянні системи (10) та постійною при  $\varepsilon_4(\varepsilon_{yz})$  в четвертому рівнянні цієї ж системи. Для визначення цього співвідношення розглянемо зсув під дією напруження  $\sigma_2$  на рис.3.

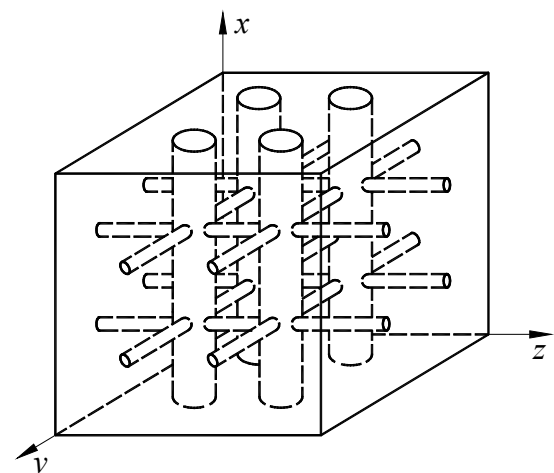
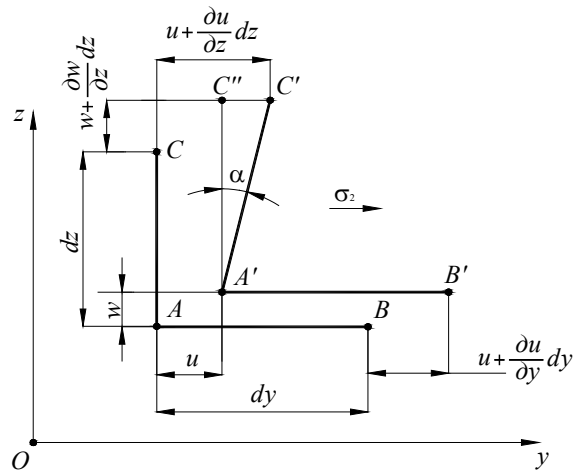


Рис. 2. Трансверсально ізотропний матеріал

Рис. 3. Схема зсуву під дією напруження  $\sigma_2$ 

Складові переміщення точки С будуть відрізнятися від складових переміщення точки А на нескінченно малу величину за рахунок зміни координати  $z$ :

$$u + \frac{\partial u}{\partial z} dz; \quad w + \frac{\partial w}{\partial z} dz.$$

Довжина проекції ребра АВ на вісь  $y$  буде дорівнювати:

$$A'B' = dy - u + u + \frac{\partial u}{\partial y} dy = dy + \frac{\partial u}{\partial y} dy. \quad (12)$$

Отже проекція абсолютного подовження ребра АВ на вісь  $y$ :

$$\Delta AB = A'B' - AB = dy + \frac{\partial u}{\partial y} dy - dy = \frac{\partial u}{\partial y} dy,$$

а відносно подовження вздовж осі  $y$  становитиме:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_y = \frac{\Delta AB}{AB} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy} = \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (13)$$

Розглянемо зміну кута між ребрами АС та АВ, що була викликана напруженням  $\sigma_2$ . Тангенс кута повороту ребра АС в площині  $yOz$ .

Обмежуючись розглядом тільки малих деформацій, можна вважати, що  $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ , і знехтувати лінійною деформацією  $\varepsilon_z$  через малість у порівнянні з одиницею. Тоді кутова деформація буде дорівнювати:

$$\varepsilon_4 = \gamma_{zy} = \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (14)$$

Так як розглядається зсув в ізотропній площині  $y, z$ , то будемо вважати, що:  $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z}$ . З цієї залежності випливає, що  $\varepsilon_2 = \varepsilon_4$ .

Враховуючи залежності між дотичними і нормальними напруженнями [8] можна записати:

$$\frac{\sigma_2 - 0}{2} = \sigma_4. \quad (15)$$

де  $\sigma_2$  – нормальне напруження,  $\sigma_4$  – тангенціальне напруження.

Виразимо  $\sigma_2$  і  $\sigma_4$  з системи  $\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j$ , де  $C_{ij}$  – матриця коефіцієнтів (11).

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \varepsilon_2 \cdot C_{22} - \varepsilon_3 \cdot C_{23}, \\ \sigma_4 &= \varepsilon_4 \cdot C_{44}. \end{aligned} \quad (16)$$

В першому рівнянні знак “-” означає протилежний напрям деформацій: по осі  $y$  – розтяг, а по осі  $z$  – стиск.

Підставивши вирази напружень  $\sigma_2, \sigma_4$  з (16) в рівняння (15), отримаємо:

$$C_{44} \cdot \varepsilon_4 = \frac{\varepsilon_2 \cdot (C_{22} - C_{23})}{2}. \quad (17)$$

Тут  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  за умови ізотропності властивостей матеріалу по координатах  $y$  та  $z$ . Враховуючи (14) формула (17) запишеться таким чином:

$$C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2}. \quad (18)$$

Ізотропність властивостей матеріалу по координатах  $y$  та  $z$  задовольняє умові  $C_{44} = C_{66}$ . Враховуючи це переписемо рівняння (18) в такому вигляді:

$$C_{44} = C_{66} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2}. \quad (19)$$

Враховуючи вищевикладене отримаємо матрицю постійних в такому вигляді:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} = C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} = C_{33} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Використання співвідношень (10, 11, 20) при практичних розрахунках пов'язане із значними експериментальними труднощами при визначенні компонент  $C_{ij}$ , з прямих фізико-механічних експериментів. Через це в практичних розрахунках будемо використовувати такі постійні, методи визначення яких відомі і детально викладені у роботах [2, 9]. Для цього переписемо рівняння (4) в такому вигляді:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \quad (21)$$

Де матриця податливостей  $S_{ij}$  визначається таким чином:

$$S_{ij} = \frac{C_{ij}^T}{|C_{ij}|},$$

де  $C_{ij}^T$  – транспонована матриця, елементами якої є алгебраїчні доповнення матриці  $C_{ij}$ ,  $|C_{ij}|$  – визначник матриці.

З умови симетрії  $C_{ij} = C_{ji}$  витікає симетрія  $S_{ij} = S_{ji}$ .

Розглянемо випадок, коли  $\sigma_1$  – єдине діюче напруження, тоді  $\varepsilon_1$ , згідно до (21) можна виразити таким чином

$$\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1 = \frac{\sigma_1}{E_{11}}. \quad (22)$$

Якщо діє тільки напруження  $\sigma_2$ , то

$$\varepsilon_2 = S_{22} \cdot \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{E_{22}}, \quad (23)$$

а якщо діє тільки напруження  $\sigma_3$ , то

$$\varepsilon_3 = S_{33} \cdot \sigma_3 = \frac{\sigma_3}{E_{33}}. \quad (24)$$

Деформації в перпендикулярних напрямках можна зв'язати такою залежністю [8]

$$\varepsilon_1 = -\nu_{21} \cdot \varepsilon_2. \quad (25)$$

Підставляючи рівняння (23) в (25) можна отримати

$$\varepsilon_1 = -\nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_{22}}, \quad (26)$$

де  $E_{ij}$  – в'язкопружні модулі;  $\nu_{ij}$  – коефіцієнти Пуассона (перший індекс показує напрямок прикладеного навантаження, а другий – напрямок зміни поперечних розмірів).

Для загального випадку нормального навантаження маємо

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_{22}} - \nu_{31} \frac{\sigma_3}{E_{33}}, \\ \varepsilon_2 &= -\nu_{12} \frac{\sigma_1}{E_{11}} + \frac{\sigma_2}{E_{22}} - \nu_{32} \frac{\sigma_3}{E_{33}}, \\ \varepsilon_3 &= -\nu_{13} \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{23} \frac{\sigma_2}{E_{22}} + \frac{\sigma_3}{E_{33}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Для загального випадку дотичного навантаження маємо

$$\varepsilon_4 = \frac{\sigma_4}{G_{23}}, \quad \varepsilon_5 = \frac{\sigma_5}{G_{13}}, \quad \varepsilon_6 = \frac{\sigma_6}{G_{12}}. \quad (28)$$

Отже, враховуючи рівняння (27) та (28) запишемо матрицю податливостей  $S_{ij}$  через в'язкопружні постійні в розгорненому вигляді для трансверсального ізотропного полімерного матеріалу

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Підставивши формулу (29) в (21) з врахуванням (20) отримаємо

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Отримана система з шести рівнянь встановлює взаємозв'язок між основними в'язкопружними параметрами полімерного матеріалу і може вважатися моделлю ізотропного орієнтованого полімеру.

У випадку однорідного напруження шарувата модель складається з  $N$  шарів, розташованих послідовно один за одним [1]. При цьому приймається, що кожен елементарний шар є трансверсальним ізотропним пружним тілом, що має площину поперечної ізотропії, а напрямком осі пружної симетрії елементарного шару визначається кут  $\varphi$  між віссю пружної симетрії і напрямком діючого напруження  $\sigma_l$ . У випадку прикладення однорідного напруження деформація кожного шару  $\varepsilon_l$  і визначається таким виразом [10]:

$$\varepsilon_l^i = \sigma_l \left[ S_{11} \cdot \sin^4 \varphi + S_{33} \cdot \cos^4 \varphi + (2S_{13} + S_{44}) \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi \right], \quad (31)$$

де  $S_{11}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{44}$  – коефіцієнти податливості елементарного шару, що відповідають орієнтованому стану полімеру.

Середня деформація всієї системи (структури ізотропного аморфно-кристалічного тіла)  $\varepsilon_l$  виразиться як:

$$\varepsilon_l^i = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_l^i}{N} = \sigma_l \left[ \frac{\sin^4 \varphi}{E_{11}} + \frac{\cos^4 \varphi}{E_{22}} + \left( \frac{1}{G_{23}} - \frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_{22}} \right) \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi \right], \quad (32)$$

де  $\sin^4 \varphi$ ,  $\cos^4 \varphi$ ,  $\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi$  – середні значення для всього полімеру

Таким чином, вираз (32) дозволяє при відомих фізико-механічних властивостях полімеру ( $E$ ,  $\nu$  та  $G$ ) передбачити мінімальні значення технологічних деформацій розтягу матеріалу, які необхідно створити в переробному пристрої, щоб почався процес руйнування структури полімеру, при чому полімерний матеріал буде руйнуватися в площині меж між шарами.

### Висновки

Запропонована математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів, що встановлює взаємозв'язок між основними в'язкопружними параметрами полімеру.

Розглянута модель, що встановлює взаємозв'язок між релаксційними компонентами технічних модулів ( $S_{ij}$ ) і релаксційними компонентами теоретичних модулів ( $C_{ij}$ ).

Отримано вираз для середньої деформації полімерного матеріалу, який дозволяє при відомих фізико-механічних властивостях полімеру передбачити мінімальні значення технологічних деформацій розтягу матеріалу, які необхідно створити в переробному пристрої, щоб почався процес руйнування структури полімеру.

### Література

1. Синюк О.М. Зменшення витрат електроенергії для частотно-імпульсних приводів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник ХНУ. – 2013. – № 6. – С. 54–58.
2. Вайткявичене А.-С. Э. Экспресс метод определения связи между показателями прочности клеевых соединений при сдвиге и расклеивании / А.-С. Э. Вайткявичене, В.-П. В. Пекаркас, В.Л. Раяукас // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 1983. – № 5. – С. 23–25.
3. Ландау Л.Д. Теоретическая физика : в 10 т. Т. VII. Теория упругости : учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.
4. Блох В.И. Теория упругости / В.И. Блох. – Харьков : Издательство Харьковского университета, 1964. – 484 с.
5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие / Ю.Н. Работнов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 712 с.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
7. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М. : Мир, 1987. – 328 с.
8. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности : учеб. пособие / В.И. Самуль. – М. : Высш. школа, 1982. – 264 с.
9. Испытательная техника : справочник / под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1982. – 528 с.
10. Розовский М.И. Некоторые свойства специальных операторов, применяемых в теории ползучести / М.И. Розовский // Прикладная математика и механика. – 1959. – Т. 23. – № 5. – С. 978–981.

### References

1. Synyuk O.M., Skyba M.Ye. Zmshennyya vytrat elektroenerhiyi dlya chastotno-impul'snykh pryvodiv. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2013. – №6. – S. 54-58.
2. Vaytkyavichene A.-S. E. Ekspress metod opredeleniya svyazi mezhdru pokazatelyami prochnosti kleevyih soedineniy pri sdvige i raskleivaniy / A.-S. E. Vaytkyavichene, V.-P. V. Pekarskas, V.L. Rayaukas // Izvestiya vuzov. Tehnologiya legkoy promyishlennosti. – 1983. – №5. – S. 23-25.
3. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. V 10-ti t. T. VII. Teoriya uprugosti: Ucheb. posobie / L.D. Landau, E.M. Lifshits – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. – 1987. – 248 s.
4. Bloh V.I. Teoriya uprugosti / V.I. Bloh.. – Harkov: Izdatelstvo Harkovskogo universitetya. – 1964. – 484 s.
5. Rabotnov Yu.N. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela: Ucheb. posobie dlya vuzov / Yu.N. Rabotnov – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. – 712 s.
6. Kachanov L.M. Osnovy teorii plastichnosti / L.M. Kachanov – M.: Nauka, 1969. – 420 s.
7. Krauch S. Metody granichnyh elementov v mehanike tverdogo tela / S. Krauch, A. Starfield. – M.: Mir, 1987. – 328 s.
8. Samul V.I. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: Ucheb. posobie dlya studentov vuzov / V.I. Samul. – M.: Vyssh. shkola, 1982. – 264 s.
9. Ispytatel'naya tehnika: Spravochnik. Pod red. V.V. Klyueva. – M. : Mashinostroenie, 1982. – 528 s.
10. Rozovskiy M.I. Nekotorye svoystva spetsialnyh operatorov, primenyaemyh v teorii polzuchesti / M.I. Rozovskiy // Prikladnaya matematika i mehanika – 1959. – T. 23. – № 5. – S. 978-981.

Рецензія/Peer review : 19.12.2014 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Диха О.В.

## ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ МОДИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З АВТОНОМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ

*Розглянута загальна методологія проведення досліджень з метою розробки теоретичних засад принципово нового процесу азотування в тліючому розряді, який забезпечував би можливість довільного комбінування його параметрів задля отримання модифікованих поверхонь з заданими експлуатаційними характеристиками.*

*Ключові слова: методологія, метод, тліючий розряд, автономні параметри, модифікований шар.*

G.M. SOKOLOVA, I.M. PASTUKH  
Khmelnitsky National University

### GENERAL METHODOLOGY OF RESEARCH OF METAL SURFACES MODIFICATION PROCESSES IN A GLOW DISCHARGE WITH THE INDEPENDENT MODE PARAMETERS

*Abstract – The basic methodological principles for implementation and study of the process of metal surfaces modification in a glow discharge with independent parameters are given. The possibility of using varied approaches to the choice of technological parameters depending on the required structure and properties of modified layer that opens up new perspectives in the study of process of metal surfaces modification is particularly emphasized.*

*The basis of the research methodology is the energy model of nitriding in a glow discharge. The essence of this model is formulated in the thesis of the priority of those surface modification subprocesses, which in concrete terms are the most energy-efficient. The method of hardware implementation of nitriding parameters independence is proposed. The methods used at various stages of the research are described.*

**Keywords:** methodology, method, glow discharge, independent parameters, modified layer.

#### Вступ

Можливість регулювання процесу насичення поверхні, що є однією з основних переваг вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій (ВДГРТ) модифікації металевих поверхонь, дозволяє отримати зміцнені шари заданої структури та фазового складу, виходячи з умов наступної експлуатації деталей. Згадане регулювання здійснюється шляхом варіювання технологічними параметрами – насамперед, режимними (температура поверхні, тиск у розрядній камері, склад газової суміші, тривалість насичення), оскільки ними відносно легко керувати у виробничих умовах. Вплив режимних параметрів азотування на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано у багатьох роботах, зокрема у [1 – 4]. Значно меншу увагу дослідники, як вітчизняні, так і зарубіжні, приділяють вивченню впливу на результати модифікації енергетичних параметрів (густина струму і напруга на електродах розрядної камери), попри те, що найбільш важливим технологічним фактором ВДГРТ, який визначає активність дифузійного насичення, “визнана густина енергії плазми, якою є питома потужність” [1, с. 33]. Не в останню чергу такий стан речей пояснюється неможливістю довільного керування енергетичними параметрами, адже у реальному процесі практично всі технологічні фактори взаємозалежні та взаємопов’язані, і чи не найсуттєвіші зв’язки взаємний вплив параметрів накладає саме на напругу та густину струму, оскільки їхньою комбінацією визначається температура процесу насичення. Цим пояснюється той факт, що теоретичні прогнози характеру формування модифікованих поверхневих шарів у значній мірі важко використати на практиці, адже комбінація вихідних параметрів впливу, яка теоретично відповідала б оптимальному характеру обробки, у більшості випадків не може бути реалізована. Таким чином, розробка теоретичних засад принципово нового процесу дифузійного насичення поверхні в тліючому розряді з автономними (взаємозалежними) параметрами відкриває абсолютно нові потенційні можливості інтенсивного та керованого формування поверхневих структур з характеристиками, які в першу чергу продиктовані умовами подальшої експлуатації виробів.

#### Аналіз джерел за темою дослідження

Аналіз робіт, у яких підсумовуються практичний досвід і теоретичні напрацювання провідних фахівців у галузі ВДГРТ модифікації металевих поверхонь [1 – 3], дозволяє зробити висновок, що головним їхнім недоліком насамперед є недосконалість та недостатня адекватність теоретичних моделей процесу (найбільш відомими з них є моделі Кольбеля-Лахтіна [1] та Арзамасова [2]) реальним процесам. Деякі з практично існуючих при цьому явищ не тільки не передбачені згаданими моделями, але й суперечать їм. Крім того, відомі моделі практично не опираються на аналітичні підходи, тому не становлять собою скільки-небудь серйозного підґрунтя для передбачення результатів обробки. Використовуваний при цьому механізм вибору параметрів технологічного режиму на основі аналізу бази даних раніше отриманих результатів обробки за досліджуваним методом важко віднести до категорії науково обґрунтованих.

У [5] наведено енергетичний аналіз згаданих теоретичних моделей, який вказує на певну невідповідність їх реальним процесам. Зазначимо, що ці моделі слід розглядати як окремі випадки одного,

більш складного процесу, причому пріоритет кожного з них залежить від конкретних умов обробки. У вказаній роботі пропонується нова, енергетична, модель процесу модифікації металевих поверхонь у тліючому розряді, у якій теорія вказаних процесів вперше формується на основі положень фізики газового розряду та принципу пріоритету енергетичних підходів. Саме ці положення дозволяють по-новому розглядати всі технології насичення металевих поверхонь дифузантами з врахуванням окремих складових підпроцесів, що розкриває більш тонкий механізм їхньої взаємодії та взаємного впливу і дає можливість, конкретизуючи роль кожного з факторів і комбінуючи їх в аспекті послідовності, тривалості фаз та їх співвідношення, досягти оптимальних кінцевих результатів обробки, причому в точній відповідності з прогнозними характеристиками обробки.

#### Постановка завдання

Практична апробація енергетичної моделі підтвердила можливість як прогнозування результатів модифікації при певній комбінації параметрів технологічного режиму, так і можливість оптимізації вибору цих характеристик. Проте ця перевага в багатьох випадках не може бути реалізована з тієї причини, що далеко не всяка комбінація параметрів в умовах конкретної садки може бути досягнутою апаратно, оскільки всі вони в реальному процесі взаємопов'язані та взаємозалежні.

Серед всіх характеристик технології найбільші умови зв'язку на інші аналогічні показники режиму накладає температура поверхні, оскільки для підтримування її необхідна деяка конкретна комбінація електричних параметрів розряду. Забезпечення певної температури поверхні за рахунок факторів, альтернативних розряду, дозволить не тільки реально оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів.

У статті підіймається питання розробки загальної методології проведення досліджень, що дозволили б сформуванню фундаментальних теоретичних засад модифікаційних технологій на основі вакуумно-дифузійних газорозрядних процесів, в яких би досліджувався механізм процесів формування модифікованих поверхневих шарів під впливом тліючого розряду з автономними параметрами.

#### Виклад основного матеріалу

Методологія дослідження як система базисних принципів досягнення поставленої мети, а також методів, способів та засобів їх реалізації, визначається насамперед його завданнями. Задача розробки теоретичних засад та апаратної реалізації принципово нового процесу азотування в тліючому розряді, який забезпечував би можливість довільного комбінювання його параметрів з метою отримання модифікованих поверхонь з заданими експлуатаційними характеристиками, може бути вирішена у кілька способів. Перший полягає у встановленні безпосереднього взаємозв'язку між вихідними параметрами азотування та експлуатаційними властивостями модифікованого шару; другий спосіб, опосередкований, передбачає встановлення взаємозв'язку між вказаними параметрами та фазовими структурами, здатними забезпечити необхідну зносостійкість поверхневого шару, а також енергетичними факторами, що виступають характеристиками ефективності основних субпроцесів (утворення нітридів, розпорошення поверхні, дифузії азоту вглиб поверхневого шару), відповідальних за формування вказаних структур. Оскільки рішення поставленого завдання є багатоваріантним, то в науково-експериментальному плані можливі дослідження за декількома напрямками, що відображено на рис. 1.

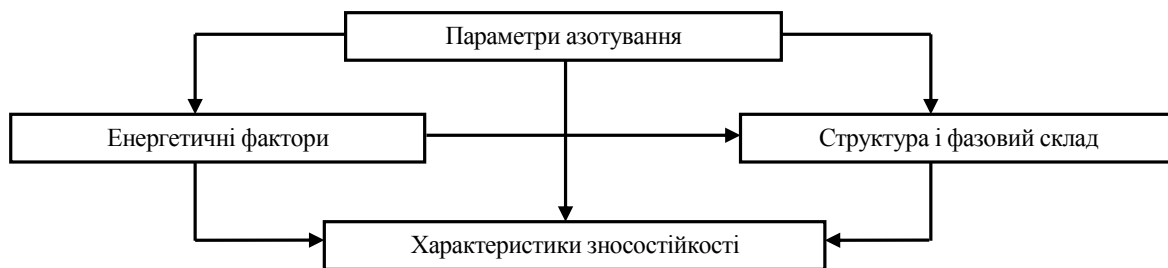


Рис. 1. Схема досліджень

В основу методології проведення досліджень покладено енергетичну модель процесу АТР. Основна концепція цієї моделі у формі системи аналітичних критеріїв пройшла експериментально-теоретичну апробацію і показала якісну адекватність цих критеріїв реальним результатам. Сутність енергетичної моделі сформульована в тезі про пріоритетність тих субпроцесів у модифікації поверхні, які в конкретних умовах енергетично найбільш доцільні.

Відправною точкою дослідження є необхідність забезпечення пріоритетності формування тієї чи іншої фазової структури за рахунок того з параметрів технологічного режиму, який в найбільшій мірі сприятиме відповідному субпроцесу, при цьому пріоритет становитимуть параметри, які відносяться до групи енергетичних. Основні показники, які характеризують електричний розряд в газі – густина струму та напруга, – відображають відповідно кількісну та енергетичну сторони потоків, котрі бомбардують поверхню, тому можливість їх довільного комбінювання сприятиме саме тим субпроцесам, які в певний момент обробки стимулюють утворення запрограмованої фазової структури. Такий концептуальний підхід дозволяє конкретизувати роль кожного з вихідних параметрів, що дозволить не тільки оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів.



Загальна методологія досліджень, відповідна сформованим вище завданням, наведена на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм загальної методології досліджень

Деякі елементи наведеного алгоритму не потребують роз'яснень, оскільки передбачають звернення до широко відомих методик. Так, металографічні дослідження, метою яких є встановлення взаємозв'язку між якісними і кількісними характеристиками структури металевих матеріалів з одного боку та їхніми фізичними, механічними, експлуатаційними та іншими властивостями з іншого боку, традиційно проводяться у чотири етапи: 1) відбір проб; 2) підготовка проб; 3) власне металографічний аналіз, що може включати мікроскопію (аналіз зображення з метою виявлення структури матеріалу); вимірювання твердості; рентгеноструктурний аналіз та ін.; 4) обробка результатів аналізу. Процедура виконання робіт на кожному з цих етапів детально висвітлена у спеціальній літературі. Крім того, для металографічного аналізу розроблений і використовується цілий ряд стандартів [6].

Натомість формування системи критеріїв оцінювання результатів азотування та аналітичне моделювання вимагають розробки спеціальних методик або вдосконалення та доопрацювання існуючих. Як приклад може бути наведена методика побудови аналітичних моделей багатofакторних процесів шляхом послідовного виключення факторів впливу у середовищі MathCAD, що дозволяє встановити вплив вихідних параметрів досліджуваного процесу на його кінцевий результат. Сутність цієї методики викладена в [5].

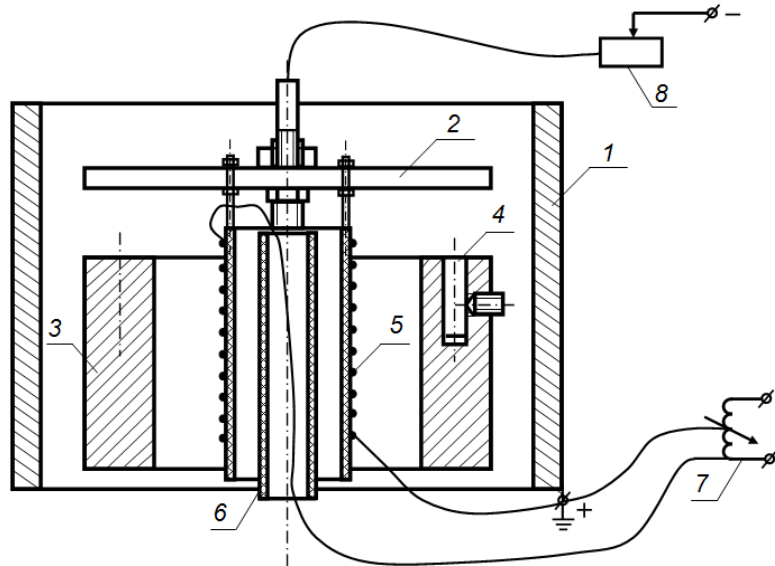
Певну складність становить методика проведення трибологічних досліджень (елемент алгоритму “Дослідження зносостійкості”), що повинні надати якісну картину зміни інтенсивності зношування матеріалів по глибині модифікованого шару та її залежності від режимів азотування, а також забезпечити можливість формування аналітичних підходів до відтворення цієї картини при зміні вихідних факторів впливу. У цьому плані чи не найбільш суттєвою методичною проблемою є неможливість врахування усіх факторів, котрі здійснюють вплив на пару тертя в умовах експлуатації, і як наслідок, неможливість адекватного відтворення умов перебігу процесів, що при цьому відбуваються. Це пояснюється не лише багатоманітністю та складністю цих процесів, але й відсутністю серед науковців єдиних поглядів на механізм зношування та критерії зносостійкості матеріалів. Таким чином, хоча вибір визначальних факторів дослідження металів на тертя та зношування і відіграє вирішальну роль у формуванні методики експерименту з дослідження зносостійкості, у ньому неминуче присутній суб'єктивний чинник, що насамперед виявляється у наданні переваги одному або кільком з великого числа запропонованих у спеціальній літературі варіантів.

Особливу увагу слід приділити такому елементу наведеного на рис. 2 алгоритму загальної методології досліджень як “Експериментальне азотування”, що по суті є ключовим етапом дослідження, який визначає результати не лише усіх наступних його етапів, але й підсумки дослідження в цілому. На вказаному етапі особливого значення набуває реалізація двох основних завдань: по-перше, модифікація установки з метою забезпечення автономності керування параметрами процесу, а по-друге, раціональний вибір режимів азотування, які б дозволили не лише визначити оптимальні з точки зору отримання необхідних експлуатаційних властивостей значення окремих параметрів та їхніх комбінацій, але й уточнити

залежності результатів азотування від вказаних параметрів, встановлені раніше іншими дослідниками.

Апаратно взаємна незалежність (автономність) параметрів режиму може досягатись по-різному. Як варіант пропонується конструктивне рішення, представлене на рис. 3.

Корпус камери 1 слугує анодом, всередині якого розміщена підвіска 2, до неї під'єднаний стакан 3, у якому встановлюються зразки 4 з різних сталей. З внутрішньої сторони стакан нагрівається спіральним нагрівачем на керамічній трубці 5 з виводом одного з кінців ніхромової обмотки через центральну керамічну трубку 6. Степінь нагріву регулюється за допомогою автотрансформатора 7. Баластний реостат 8 застосовується для зміни співвідношень між струмом і напругою.



1 – корпус камери; 2 – підвіска; 3 – стакан; 4 – зразки; 5 – нагрівач; 6 – центральна керамічна трубка; 7 – автотрансформатор; 8 – баластний реостат  
Рис. 3. Схема дослід з азотування у тліючому розряді з автономними параметрами

Взірці з досліджуваних сталей (сталь 45, 40X, 38X2МЮА) передбачається обробляти за різними технологічними режимами. З огляду на необхідність економії матеріальних та енергетичних ресурсів, а також прагнення оптимізувати тривалість досліджень, кількість експериментів доцільно звести до мінімально необхідної з точки зору досягнення цілей дослідження.

Дотримання зазначених умов цілком можливе при проведенні 21 технологічного процесу відповідно до режимів, наведених у таблиці 1, причому склад газової суміші та тривалість обробки приймаються постійними, а  $T_1 < T_2 < T_3$ ;  $p_1 < p_2 < p_3$ ;  $U_1 < U_2 < U_3$ ;  $j_1 < j_2 < j_3$ . Значення режимних параметрів азотування (температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу) можуть бути призначені, виходячи з типових технологічних режимів, наведених у [7], що були складені на основі досвіду, отриманого при проведенні багаторічних експериментальних і виробничих робіт. Вибір значень енергетичних параметрів вимагає проведення попередніх експериментів.

Таблиця 1

**Матриця режимів азотування**

Група режимів	Номер режиму	Температура, °C	Тиск, торр	Напруга, В	Густина струму, А/м <sup>2</sup>
1	1	$T_2$	$p_2$	$U_1$	$j_1$
	2			$U_1$	$j_2$
	3			$U_1$	$j_3$
	4			$U_2$	$j_1$
	5			$U_2$	$j_2$
	6			$U_2$	$j_3$
	7			$U_3$	$j_1$
	8			$U_3$	$j_2$
	9			$U_3$	$j_3$
2	10	$T_1$	$p_2$	$U_2$	$j_2$
	11			$U_1$	$j_3$
	12			$U_3$	$j_1$
3	13	$T_3$	$p_2$	$U_2$	$j_2$
	14			$U_1$	$j_3$
	15			$U_3$	$j_1$
4	16	$T_2$	$p_1$	$U_2$	$j_2$
	17			$U_1$	$j_3$
	18			$U_3$	$j_1$
5	19	$T_2$	$p_3$	$U_2$	$j_2$
	20			$U_1$	$j_3$
	21			$U_3$	$j_1$

За такого підходу до організації експериментів порівняння результатів, отриманих після проведення

азотування за режимами групи 1, дозволить визначити вплив енергетичних параметрів на досліджувані властивості модифікованих шарів. Відповідно процеси, проведені за режимами груп 1 (3, 5 та 7-й режими), 2 та 3, дають можливість дослідити вплив температури, а груп 1 (3, 5 та 7-й режими), 4 та 5 – вплив тиску на вказані властивості, причому за умови, якою досі нехтували при аналогічних дослідженнях, а саме – незалежно від значень напруги і сили струму.

Встановлення чітких, однозначних залежностей між результатами процесу модифікації і кожним з технологічних параметрів, при апаратному забезпеченні автономності керування ними, надасть широкі можливості для абсолютно довільної їх комбінації з метою активізації будь-якого з основних субпроцесів (утворення нітридів, розпорошення поверхні, дифузії азоту вглиб поверхневого шару), що визначають розмір, структуру та фазовий склад модифікованого шару, а отже й його експлуатаційні властивості.

### Висновки

Сформульовані основні методологічні засади з реалізації та дослідження процесу модифікації металевих поверхонь у тліючому розряді з автономними параметрами. Особливо підкреслено, що можливість варіативних підходів до задавання технологічних параметрів залежно від необхідної за умовами наступної експлуатації виробів структури модифікованого шару відкриває принципово нові перспективи у вивченні тонкого механізму явищ, які мають місце при реалізації процесів ВДГРТ модифікації металевих поверхонь, а в подальшому істотно розширять ареал застосування цих технологій з підвищенням якості обробки, так і характеристик продуктивності та ресурсоемкості. При цьому стає реальним не тільки встановити загальні теоретичні положення ефективності застосування різних методів автономізації параметрів режиму, але й розробити практичні аспекти оптимального їх застосування, в тому числі – енергоефективності.

### Література

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.
2. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.
3. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бёмер. – М. : Metallurgiya, 1991. – 320 с.
4. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : диссертация на соискание научной степени доктора технических наук : 05.02.01 / Каплун Виталий Григорьевич. – Хмельницкий, 1990. – 451 с.
5. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.03.07 / Пастух Ігор Маркович. – Хмельницький, 2008. – 520 с.
6. Металлографические исследования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.modificator.ru/terms/metallography\\_research.html](http://www.modificator.ru/terms/metallography_research.html)
7. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

### References

1. Ionnyaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratukhin, Y. S. Yeliseyev, T. A. Panayoti. – Moscow : Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1999. – 400 s.
2. Lakhtin Y. M. Azotirovaniye stali / Y. M. Lakhtin, Y. D. Kogan. – M. : Mashinostroyeniye, 1976. – 256 s.
3. Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya / Y. M. Lahtin, Y. D. Kogan, H.-Y. Shpitz, Z. Bëmer. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 320 s.
4. Nauchnye osnovy tekhnologii uprochneniya detaley mashin i instrumenta ionnym azotirovaniyem v bezvodnorodnykh sredah: dysertatsia na soyskanye nauchnoy stupeniya doktora tekhnichnykh nauk: 05.02.01: zakhyschena 08/06/1990: zatv. 12.16.1990 / Kaplun Vitaliy Hryhorevych. - Khmelniitsky, 1990. - 451 s.
5. Fisisco-tekhnichna obrobka poverkhni metalliv bezvodnevym azotuvanniam v tliyuchomu rozrjadi: dysertatsia na zdobuttia naukovogo stupeniya doktora tekhnichnykh nauk: 05.03.07: zakhyschena 08.06.2008: zatv. 16.12.2008 / Pastukh Igor Markovich. – Khmelniitsky, 2008. – 520 s.
6. Metallohrayficheskye issledovaniya. URL: [http://www.modificator.ru/terms/metallography\\_research.html](http://www.modificator.ru/terms/metallography_research.html)
7. Pastukh I. M. Theoriya i praktyka bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleushchem razrjade. – Kharkov, Natsionalnyi nauchnyi tsentr “Kharkovskiy fiziko-tekhnicheskyy institut”, 2006 – 364 s.

Рецензія/Peer review : 30.1.2014 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

І.Г. ДОБРОТВОР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

П.Д. СТУХЛЯК, О.С. ГОЛОТЕНКО

Тернопільський національний економічний університет

## МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ В ЕПОКСИКОМПОЗИТ З ВОЛОКНИСТИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

Асиметрія полів миттєвих напружень, які виникають в об'ємі матеріалу у процесі формування композитних матеріалів з волокнистим наповнювачем, залежить від умов тверднення, геометричних параметрів наповнювача та нерівномірності характеристик кінетики перехідних зон епоксикомпозитів. Такі явища є відгуком на релаксаційні повільно затухаючі процеси в об'ємі композитів навколо волокон наповнювача. Інформація про хвильові процеси в об'ємі матеріалу є важливою, оскільки пружні хвилі можуть бути високоефективним інструментом дослідження напружено-деформованого стану, а також структури і властивостей композитних матеріалів.

**Ключові слова:** композит, наповнювач, напруження, структура, кінетика, коливність, фазова швидкість, групова швидкість.

I.G. DOBROTVOR

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

P.D. STUHLYAK, O.S. GOLOTENKO

Ternopil National Economic University

### MODEL OF INTERNAL TENSIONS WAVES DISTRIBUTION IN EPOXY COMPOSITE WITH FIBRED FILLER

**Abstract** - The important stage of problem decision of the sewing together level of composite materials transitional zones is the development of receipt methodologies information about the interphase co-operating of matrix macromolecules with active centers on the surface of mineral filler at material forming process. The actual task of modern technologies is creation of compos and coverages on their basis, research of processes of formation of zones between a filler and epoxy matrix, and also dynamics of their forming at gelation of materials on verge of division of phases "filler - epoxy matrix". As a rule in most cases of transitional zones property determine properties of material. They consist of adhesion superficial layers and layers, remaining tensions that arise up at forming of composite influence on descriptions of that. Asymmetry of the instantaneous tensions fields, that arise up in the volume of material in the process of composite materials forming with a fibred filler, depends on the terms of solidifiability, geometrical parameters of filler and unevenness of descriptions of kinetics of transitional zones of epoxy composite. Information about wave processes in the volume of material is important, as resilient waves can be the high-efficiency research instrument of the tensely-deformed state and also structure and properties of composite materials. Comparing phase speed to well-known speed of longitudinal waves in material case-insensitive his microstructure, it is possible to ground conclusions about descriptions of forming of microstructure of epoxy composites, creating terms the same for adjusting of speed of sewing together of matrix of filled composites.

**Key words:** composite, filler, tension, structure, kinetics, phase speed, group speed.

### Постановка задачі

У процесі формування композитних матеріалів (КМ) з волокнистими наповнювачами в об'ємі матеріалу виникають миттєві напруження, поля яких характеризуються асиметрією. Остання залежить від умов тверднення, геометричних параметрів наповнювача та нерівномірності характеристик кінетики зовнішніх поверхневих шарів, котрі виникають на межі поділу фаз у системі „зв'язувач – наповнювач”. Тому елементарні об'єми середовища формування матеріалу, по котрих ведуться усереднення властивостей, слід розглядати як складний об'єкт із властивостями мікродеформацій та осциляційними хвильовими характеристиками. Такі явища є відгуком на релаксаційні повільно затухаючі процеси в об'ємі композитів навколо волокон наповнювача.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо, що дослідження структурних характеристик поверхневих шарів є важливим для встановлення механізму структуроутворення матеріалів у присутності добавок різної фізичної природи [1].

Елементарні об'єми середовища формування матеріалу, по котрих ведуться усереднення властивостей, слід розглядати як складний об'єкт із властивостями мікродеформацій та осциляційними хвильовими характеристиками. Такі явища є відгуком на релаксаційні повільно затухаючі процеси в об'ємі композитів навколо волокон наповнювача. Інформація про хвильові процеси в об'ємі матеріалу є важливою, оскільки пружні хвилі можуть бути високоефективним інструментом дослідження напружено-деформованого стану а також структури і властивостей композитних матеріалів (КМ). Це дозволить використати її для розробки нових методів і засобів вимірювання та прогнозування властивостей КМ.

Основні гіпотези теорії двокомпонентних твердих сумішей були сформульовані у роботі [2], згідно яких композит представляє собою два взаємно проникаючі континууми (неперервні середовища). Кожна точка області середовища, що заповнена композитом, одночасно зайнята обома компонентами, між якими проходить взаємне відносне переміщення із деякою деформацією окремих континуумів. Теорія двокомпонентної суміші була узагальнена на випадок врахування геометричної та фізичної неоднорідності. Показано, що при русі пружного імпульсу вздовж шарів композиту між шарами виникає силова взаємодія, яка є наслідком відмінностей зсувних властивостей шарів. Сила такої взаємодії прямо пропорційна різниці

усереднених переміщень в контактуючих шарах [3].

Об'єктом дослідження вибрано епоксидановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується незначною усадкою, високою адгезійною та когезійною міцністю, технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, розвинутою сировинною базою. Як зв'язувач при формуванні КМ використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Тверднення здійснювали поліетеленполіаміном (ПЕПА). Як армуючі наповнювачі використовували базальтові та скляні волокна, властивості яких наведено у табл. 1. [1]. Досліджували вплив волокнистих наповнювачів різної фізичної та хімічної природи на процеси зшивання епоксикомпозитів за зміною їхніх динамічних характеристик. Як армуючий наповнювач використали скляні та базальтові безперервні волокна з діаметром 9–12 мкм.

В процесі оцінювання часових змін напружень у зв'язувачі навколо наповнювачів при зшиванні КМ, що містять епоксидну смолу і мінеральні волокна, використовували результати досліджень модуля зсуву  $G_k$ .

Таблиця 1

Характеристики волокнистих наповнювачів

Характеристики	Скляне волокно	Базальтове волокно
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2500	1700
Температура плавлення, К	1570–1920	1520
Діаметр неперервного волокна, мкм	10–12	9–11
Міцність при розриванні, МПа	2200–2600	2200–2800
Збереження міцності, %		
при 473 К	100	100
при 673 К	50	80
при 973 К	-	50
Модуль пружності, ГПа	64–73	71–90
Водопоглинання, %	0,20	0,01

**Метою досліджень** є визначення характеристик ступеню зшивання перехідних зон КМ, що суттєво впливає на адгезійну та когезійну міцність КМ і визначає їх фізико-механічні та теплофізичні властивості. Тому дослідження динаміки процесів формування їх, зміни структурних характеристик і геометричних розмірів при структуроутворенні матеріалу, а також створення методів їх прогнозованого регулювання є актуальною задачею сучасного матеріалознавства при створенні композитів та покриттів на їх основі.

Інформація про хвильові процеси в об'ємі матеріалу є важливою, оскільки пружні хвилі можуть бути високоефективним інструментом дослідження напружено-деформованого стану, а також структури і властивостей епоксикомпозитів. Константи, що описують мікроструктуру композитів, можуть стати одним із основних факторів для створення моделей середовищ формування матеріалу [3].

Відмітимо, що недостатність інформації про константи мікроструктури середовища композиту є одним з основних факторів труднощів моделювання і перешкоджає розрахункам характеристик динаміки епоксикомпозитних матеріалів із волокнистими та дисперсними наповнювачами.

#### Обговорення результатів дослідження

Одним із засобів є дослідження розв'язків диференційного рівняння, що описує поширення плоских поздовжніх хвиль континууму неперервного середовища КМ із волокнистими наповнювачами в процесі тверднення, що поширюються в напрямку вибраної осі  $x$ , і яке отримуємо із рівняння динаміки середовища з моментальними напруженнями:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta_0 \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

Де  $u = u(x, t)$  – зміщення центру мас елементарного структурного елемента композиту із координатою  $x$  по відповідній осі,  $\beta_0$  – малий параметр дисперсності середовища армованих композитів, що залежить від часу  $t$  тверднення композиту, армованого мінеральними волокнами і від  $T$  – часового проміжку коливності значень модуля зсуву матеріалу  $G(t)$ .

$$\beta_0 = \frac{4GM^2}{L^2} \cdot \frac{1 + \mu}{\lambda + 2G},$$

де

$$M \approx \frac{h_1^2}{h_2} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{h_1}{h_2}\right) \cdot \frac{E_a}{E_c}},$$

значення характеристики просторової структури матеріалу,

$$\lambda = \frac{2\mu G}{1 - 2\mu}$$

- пружна стала другого порядку,  $L$  – довжина хвилі поширення внутрішніх напружень,

$$L = v_1 \cdot T,$$

$v_1(t)$  – швидкість зміни модуля зсуву  $G(t)$  композитного матеріалу, армованого скляними волокнами,  $T$  – часовий проміжок коливності значень  $G(t)$  [4],  $h_1$ ,  $h_2$  – товщина армуючого елемента,  $h_2$  – відстань між серединними площинами сусідніх армуючих елементів,  $E_a$  і  $E_c$  – модулі Юнга відповідно армуючого і зв’язуючого матеріалів,  $G$  – модуль зсуву,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Асиметрія полов миттєвих напружень, які виникають в об’ємі матеріалу у процесі формування композитних матеріалів з волокнистим наповнювачем, залежить від умов тверднення, геометричних параметрів наповнювача та нерівномірності характеристик кінетики перехідних зон КМ. Визначення параметрів кінетики  $\beta_0$  та  $T$  здійснюється шляхом встановлення графічних залежностей змін модуля зсуву епоксикомполімерів у часі досліджували відповідно до ГОСТу 14760-69. В процесі дослідження встановлено, що для КМ із базальтовими, вуглецевими та скляними волокнами параметр  $T$  становить відповідно 4,6; 4,8 та 5,2 год (рис. 1) [2].

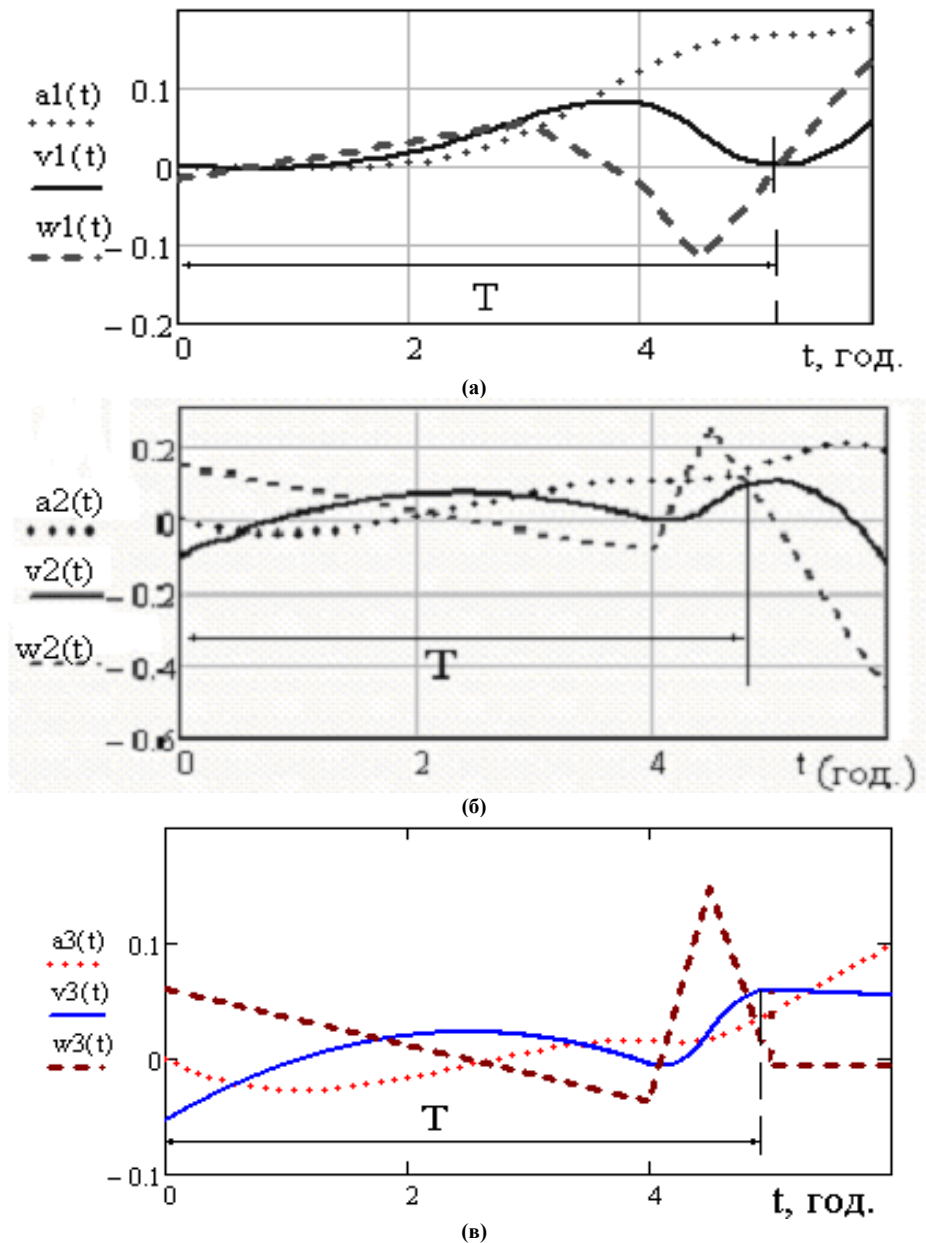


Рис.1. Графіки зміни модуля зсуву від часу  $a(t)$  (ГПа) а також першої  $v(t)$  та другої  $w(t)$  похідних по часу на протязі періоду коливності  $T$  в процесі тверднення епоксикомполімерного матеріалу із скляними (а), базальтовими (б) та вуглецевими (в) волокнами

Для дослідження розв’язків рівняння (1) розв’язуємо дисперсне рівняння виду:

$$\omega^2 - k^2 - \beta_0 k^4 = 0,$$

звідки знаходимо закон дисперсії поздовжніх хвиль у середовищі з моментальними напруженнями:

$$\omega(k) = k \cdot \sqrt{1 + \beta_0 k^2}.$$

Із представлення  $\beta_0$  слідує, що фазова швидкість змін фізико-механічних характеристик  $\omega(k)$  може описувати спостережувану в експериментах дисперсію хвильових процесів для тих КМ, у яких швидкість хвилі росте при збільшенні частоти (рис. 2).

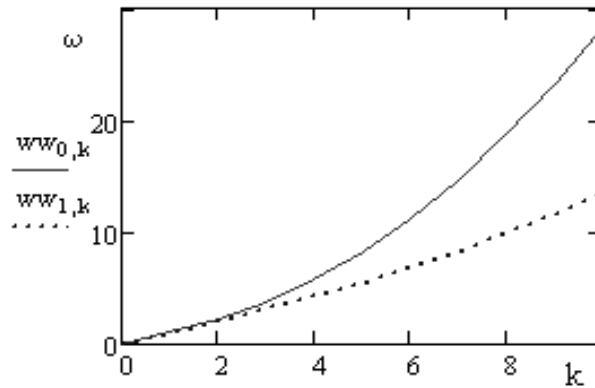


Рис.2. Закон дисперсії поздовжніх хвиль відносно хвильового числа  $k$  для епоксикомпозиту армованого скляними волокнами:  $\omega_0(k)$  – для початку тверднення матеріалу та  $\omega_1(k)$  – для першої години після початку тверднення.

Групову швидкість  $v_{gr}(k)$ , яка залежить від частоти  $\omega$ , шукаємо по формулі:

$$v_{gr}(k) = \frac{(1 + 2\beta_0 k^2)^2}{\sqrt{1 + \beta_0 k^2}} = v_f + \frac{\beta_0 k^2}{\sqrt{v_f}},$$

де  $v_f$  – фазова швидкість,

$$v_f(k) = \frac{\omega}{k} = \pm \sqrt{1 + \beta_0 k^2},$$

$k$  – хвильове число (рис.1).

Фазова і групові швидкості не є постійними величинами, а залежать від частоти, а отже, наявність в середовищі миттєвих напружень приводить до дисперсії поздовжньої хвилі.

Крім того, відносна величина фазової швидкості плоскої поздовжньої хвилі задовольняє співвідношення:

$$\frac{v_f(k)}{c_l} = \sqrt{1 - \left(0.2M \cdot \frac{c_\tau}{c_l} k\right)^2},$$

де  $c_l, c_\tau$  – швидкості поширення поздовжніх хвиль та хвиль зсуву у матеріалі без врахування його мікроструктури (яка описується модулем  $M$ ),  $k$  – хвильове число. По останній формулі можна будувати залежності, що дозволять оцінити залежність величини швидкості звуку із дисперсністю зерен наповнювача у матеріалі.

Із представлення  $\beta_0$  слідує, що фазова швидкість  $v_f(k)$  в якісній формі описує спостережувану в експериментах дисперсію ультразвуку для тих матеріалів, у яких швидкість хвилі росте при збільшенні частоти. Дослідження групової та фазової швидкостей від часу тверднення  $t$  та хвильового числа  $k$  у епоксикомпозиті з базальтовим наповнювачем показали (рис.3) існування особливості зміни групових швидкостей в околі 4-ї години тверднення матеріалу. Це підтверджується дослідженнями залежностей фізико-механічних властивостей у композитах із базальтовими волокнами на початкових етапах формування композитів та існуванням точки перегину на кривій зміни модуля зсуву від часу тверднення [4].

Порівнюючи швидкість  $\omega(k)$  із відомою швидкістю  $c$  поздовжніх хвиль в матеріалі без врахування його мікроструктури, можна обґрунтовувати висновки про характеристики формування мікроструктури епоксикомпозитів, тим самим створюючи умови для регулювання швидкості зшивання матриці наповнених композитів. На наш погляд це пов'язано з максимальним гелеутворенням матриці, причому у такому випадку формуються кластери поверхневих шарів значної протяжності.

Дослідження і обґрунтування таких закономірностей дозволить прогнозувати керувати фізико-механічними процесами при формуванні матеріалу і, як наслідок, експлуатаційними характеристиками епоксикомпозитів.

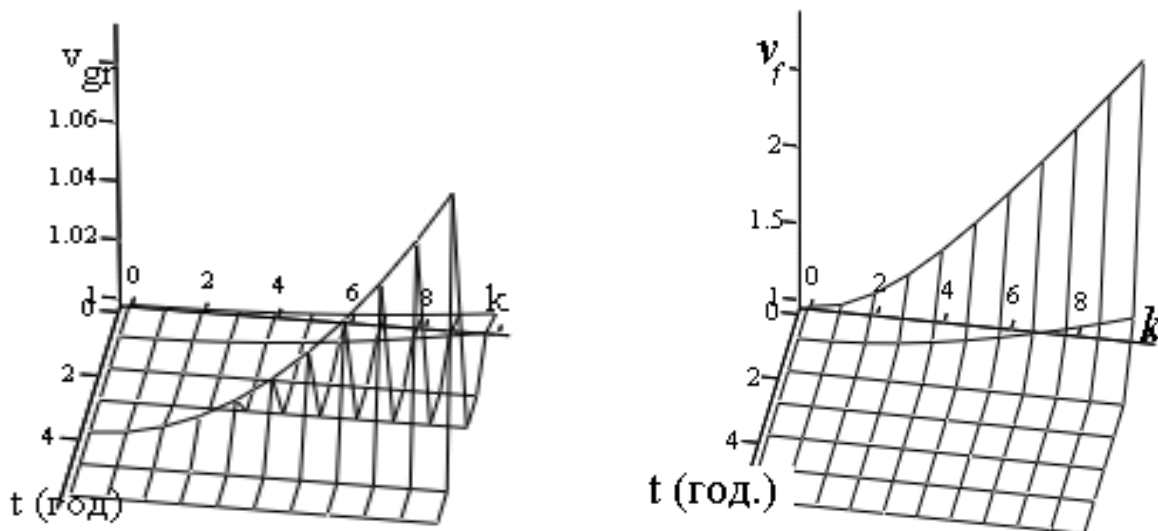


Рис.3. Графіки групової та фазової швидкостей порівняно із межовими швидкостями  $c$  поздовжніх хвиль відносно хвильового числа  $k$  та часу від початку тверднення  $t$  епоксикомпозиту армованого базальтовими волокнами.

**Висновки.** Встановлено, що на різних етапах зшивання епоксидного зв'язувача відбувається зміна механічних характеристик поверхневих шарів, внаслідок фізичного зшивання макромолекул епоксидної смоли з активними центрами на поверхні наповнювача. Водночас, найсуттєвіше підвищення модуля пружності поверхневих шарів навколо наповнювачів спостерігали для періоду  $t = 4,0-5,0$  год. від початку тверднення епоксидних композитів, що зумовлено перебігом процесів хімічного зшивання на межі поділу фаз наповнювач – олігомер. Встановлено, що дисперсія поздовжніх хвиль в процесі тверднення матеріалу спадає і є близькою до нуля в кінці процесу тверднення в тому числі і для великих хвильових чисел.

### Література

1. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, Є.М. Кальба. – Тернопіль : Збруч, 2005. – 182 с.
2. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой / Ерофеев В.И. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 328 с.
3. Green A.E., Steel T.R. Constitutive Equation for Interacting Continua. *Int. J. Engng. Sci.*, 1966. V. 4, N 4. P. 483–500.
4. Налимов В.В. Теория эксперимента / Налимов В.В. – М. : Наука, 1971. – 208 с.
5. Добротвор І.Г. Дослідження параметрів поверхневих шарів при зшиванні епоксикомпозитів, що містять волокнистий і дисперсний наповнювач / І.Г. Добротвор, П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, В.В. Левицький // Вісник ТДТУ. – 2007. – № 1. – С. 43–50.

### References

1. Buketov A.V., Stukhlyak P.D., Kalba Y.M. Fizyko-khimichni protsesy pry formuvanni epoksydnykh materialiv., Ternopil:Zbruch.-2005, 182 p.
2. Yerofeev V.I. Volnovye protsesy v tverdykh telakh s mikrostruktyuroy., Moskva.:Izdatilstvo Moskovskogo universyteta, 1999, 328 p.
3. Green A.E., Steel T.R. "Constitutive Equation for Interacting Continua", *Int. J. Engng. Sci.*, V.4, 1966, pp 483-500.
4. Nalimov V.V. Teoriya eksperimenta., Moskva:Nauka, 1971, 208 p.
5. Dobrotvor I.G., Stukhlyak P.D., Buketov A.V., Levytsky V.V. Doslidzhennya parametriv poverkhneykh shariv pry zshyvanni epoksykomposytiv, shcho mistyat' voloknistyy i dyspersnyy napovnyuvach., Ternopil: Vysnyk TDTU, 2007, pp 43-50.

Рецензія/Peer review : 26.1.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н. Пашенко Є.О.



## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИВОДІВ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ТА АВТОМАТІВ

Ефективність роботи в'язальних машин та автоматів, зокрема рукавичних, суттєво залежить від динамічних навантажень, що виникають під час пуску. З метою зниження пускових динамічних навантажень доцільно в складі привода в'язальних машин та автоматів використовувати пристрої зниження динамічних навантажень. При цьому важливими є питання впливу параметрів такого пристрою на динамічні навантаження привода в'язальної машини або автомата. Встановлено, що з метою вирішення цього питання реальні конструкції машин та автоматів доцільно представити у вигляді двомасової динамічної моделі. Встановлено, що на динамічні навантаження привода суттєво впливають пусковий момент привода та момент інерції ведучої маси пристрою. Доцільно також використовувати в приводі в'язальних машин та автоматів пристрої, що забезпечують попереднє напруження в'язей привода. Результати досліджень можуть бути використані під час розробки нових моделей в'язальних машин та автоматів з пристроями зниження динамічних навантажень.

**Ключові слова:** пристрій зниження динамічних навантажень, в'язальна машина, рукавичний автомат, привод в'язальної машини, привод рукавичного автомата, динамічні навантаження привода.

B.F. PIPA, S.V. MUZYCHISHIN, A.V. CHABAN  
Kyiv National University of Technologies and Design

### INFLUENCE OF PARAMETERS OF DEVICE OF DECLINE OF THE DYNAMIC LOADING ON THE DYNAMIC LOADING OF DRIVES OF KNITTING MACHINES AND AUTOMATS

Efficiency of work of knitting machines and automats, in particular glove, substantially depends on the dynamic loading, arising up at starting. With the purpose of decline of the starting dynamic loading expediently in composition the drive of knitting machines and automats to use the devices of decline of the dynamic loading. Thus important is a question of influence of parameters of such device on the dynamic loading of drive of knitting machine or automat. It is set that with the purpose of decision of this question the real constructions of machines and automats it is expedient to present as of dynamic model. It is set that on the dynamic loading of drive the starting moment of drive and moment of inertia of leading mass of device influence substantially. Expediently also to use in the drive of knitting machines and automats devices, providing preliminary tension of connections of drive. The results of researches can be drawn on at development of new models of knitting machines and automats with the devices of decline of the dynamic loading.

**Keywords:** device of decline of the dynamic loading, knitting machine, glove automat, drive of knitting machine, drive of glove automat, dynamic loading of drive.

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи в'язальних машин та автоматів, є зниження динамічних навантажень, що виникають під час пуску. Дослідження [1–4] показують, що динамічні навантаження суттєво впливають як на довговічність роботи в'язальних машин та автоматів, так і на якість продукції, що випускається. Тому проблема зниження динамічних навантажень є однією із актуальних проблем трикотажного машинобудування. Для розв'язання цієї проблеми важливим є розробка нових конструкцій приводів в'язальних машин та автоматів з пристроями зниження динамічних навантажень (ПЗДН). Проте відсутність наукових основ і інженерних методів проектування таких приводів стримує вирішення існуючої проблеми.

#### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано вплив параметрів ПЗДН на динамічні навантаження приводів в'язальних машин та автоматів. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теорії динаміки механічних систем з пружними в'язями та теорії проектування в'язальних машин і автоматів.

#### Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи в'язальних машин та автоматів (підвищення продуктивності та якості виробів) шляхом удосконалення ПЗДН, стаття присвячена аналізу впливу параметрів ПЗДН на динамічні навантаження приводів в'язальних машин та автоматів.

#### Результати та їх обговорення

Аналіз сучасних конструкцій в'язальних машин та автоматів [1–4] показує, що з метою дослідження динамічних процесів, які відбуваються в приводі під час пуску, їх реальну конструкцію доцільно замінити двомасовою динамічною моделлю (рис. 1) з параметрами:  $T_1$  – пусковий момент електродвигуна (тут і надалі вказані параметри наведені);  $T_2$  – статичний момент привода (сумарний момент сил опору механізмів машини);  $J_1$  – момент інерції ротора електродвигуна з урахуванням моменту інерції ведучого шківів клинопасової передачі;  $J_2$  –

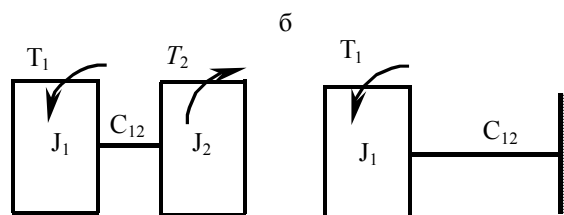


Рис. 1. Двомасова динамічна модель привода в'язальної машини або автомата

сумарний момент інерції обертальних мас механізмів машини;  $C_{12}$  – жорсткість пасів клинопасової передачі.

При виборі параметрів динамічної моделі приводу слід враховувати рекомендації робіт [2, 3, 5, 6], присвячених дослідженням динамічних процесів в механічних системах з пружними в'язями. При цьому реальні параметри в'язальної машини або автомата слід наводити до одного із валів приводу.

Як відомо [3, 5] пуск двомасової механічної системи відбувається в два етапи. Перший етап пуску (рис. 1, б) характеризується рухом першої маси системи, який продовжується від 0 до  $\tau_1$ , поки момент в пружній в'язі  $C_{12}$  не досягне величини  $T_2$ . При цьому починається другий, остаточний етап пуску (рис. 1, а), який характеризується рухом обох мас системи і продовжується від  $\tau_1$  до часу пуску машини  $t_n$ .

Рівняння руху обертальних мас системи для першого етапу пуску мають вигляд:

$$J_1 \ddot{\phi}_1 + C_{12} \phi_1 = T_1, \quad (1)$$

де  $\phi_1$  – кут повороту ведучої маси.

Розв'язок диференційного рівняння (1) можемо представити у вигляді [2, 5]:

$$T_{12} = A_{12} \cos \beta \cdot t + B_{12} \sin \beta \cdot t + a_{12}, \quad (2)$$

де  $T_{12}$  – момент пружних сил, що виникає у в'язі  $C_{12}$ ,

$$T_{12} = C_{12} \cdot \phi_1; \quad (3)$$

$A, B$  – постійні диференціювання;

$\beta$  – циклова частота коливань маси  $J_1$  системи,

$$\beta = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}}; \quad (4)$$

$a_{12}$  – постійна складова моменту  $T_{12}$ , згідно з [2, 5]:

$$a_{12} = T_1. \quad (5)$$

Враховуючи початкові умови першого етапу пуску системи  $T_{(12)0} = 0; \dot{T}_{(12)0} = 0$ , знаходимо:

$$A_{12} = -T_1; \quad B_{12} = 0. \quad (6)$$

Підставивши (5), (6) в (2), знаходимо:

$$T_{12} = T_1 (1 - \cos \beta \cdot t). \quad (7)$$

З рівняння (7) знаходимо тривалість першого етапу пуску системи (початок другого етапу пуску)  $\tau_1$ , враховуючи, що другий етап пуску розпочинається при умові  $T_{12} = T_2$ :

$$\tau_1 = \frac{1}{\beta} \arccos \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (8)$$

Переходимо до другого етапу пуску системи, який починається при початкових умовах ( $t = 0$ ):

$$T_{(12)0} = T_2; \quad \dot{T}_{(12)0} = T_1 \beta \cdot \sin \beta \cdot \tau_1. \quad (9)$$

Рівняння руху мас системи під час другого етапу пуску мають вигляд [2, 5]:

$$J_1 \ddot{\phi}_1 = T - T_{12}; \quad J_2 \ddot{\phi}_2 = T_{12} - T_2. \quad (10)$$

Підставивши параметри  $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2$ , знайдені із (9), в рівняння  $\ddot{T}_{12} = C_{12} (\ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_2)$ , знаходимо:

$$\ddot{T}_{12} = \frac{C_{12}}{J_2} \left[ T_1 \frac{J_2}{J_1} + T_2 - \left( 1 + \frac{J_2}{J_1} \right) T_{12} \right]. \quad (11)$$

Розв'язок диференційного рівняння (10) можемо представити у вигляді, наведеному раніше. Для другого етапу пуску системи параметри рівняння (2) знаходяться, враховуючи початкові умови та рекомендації [2, 5], наступним чином:

$$A_{12} = T_2 - T_1; \quad B_{12} = \frac{\dot{T}_{(12)0}}{\beta_1}; \quad a = \frac{T_1 J_2 + T_2 J_1}{J_1 + J_2}; \quad \beta_1 = \sqrt{\frac{C_{12} (J_1 + J_2)}{2 J_1 J_2}}. \quad (12)$$

Тоді, аналізуючи рівняння (2) та враховуючи рекомендації щодо складання коливань моментів сил пружності однакової частоти [5], приходимо до висновку, що максимальна величина моменту  $T_{12}$  буде дорівнювати:

$$T_{12 \max} = D + a = \sqrt{A_{12}^2 + B_{12}^2} + a, \quad (13)$$

де  $D$  – сумарна амплітуда коливань моментів сил пружності.

Підставивши одержані результати (12) в рівняння (13), знаходимо:

$$T_{12\max} = \sqrt{(T_2 - T_1)^2 + \left[ \frac{T_1 \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}} \sin \left\{ \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}} \cdot \sqrt{\frac{J_1}{C_{12}}} \arccos \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right\}}{\sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}} \right]^2} + \frac{J_2 T_1 + J_1 T_2}{J_1 + J_2}. \quad (14)$$

Після перетворень вираз (14) остаточно приймає вигляд:

$$T_{12\max} = \sqrt{(T_2 - T_1)^2 + \frac{T_1^2 J_2 \sin^2 \left[ \arccos \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{J_1 + J_2}} + \frac{J_2 T_1 + J_1 T_2}{J_1 + J_2}. \quad (15)$$

Аналіз залежності (15) показує, що жорсткість пружної в'язі, в ролі якої в більшості приводів в'язальних машин та автоматів зазвичай виступає жорсткість клинових пасів клинопасової передачі, не впливає на величину максимальних динамічних навантажень, що виникають під час пуску.

Для оцінки впливу інших параметрів приводу на величину пускових динамічних був використаний персональний комп'ютер. Метою розрахунків стало одержання графіків залежностей  $T_{12\max} = f(T_1)$ ,  $T_{12\max} = f(T_2)$ ,  $T_{12\max} = f(J_1)$ ,  $T_{12\max} = f(J_2)$ . В програмі розрахунків передбачено обчислення максимальної величини динамічного моменту  $T_{12\max}$  залежно від одної змінної величини. Тобто спочатку виконувався розрахунок  $T_{12\max} = f(T_1)$  при постійних (нульових) величинах параметрів  $T_2$ ,  $J_1$ ,  $J_2$  потім  $T_{12\max} = f(T_2)$  при постійних (нульових) величинах параметрів  $T_1$ ,  $J_1$ ,  $J_2$  і так далі.

Оцінимо вплив параметрів ПЗДН на динамічні навантаження, що виникають в приводі, як приклад, круглов'язальної машини КО-2 з електродвигуном типу 100L6У3, потужність якого 2,2 кВт та частота обертання валу 950 об/хв ( $\omega = 99,48 \text{ с}^{-1}$ ).

Аналіз конструктивних особливостей приводу з ПЗДН круглов'язальної машини типу КО-2 з діаметром голкового циліндру 450 мм [7] та перспектив її удосконалення дозволяє в якості діапазонів та інтервалів варіювання досліджуваних параметрів (приведені до валу електродвигуна) прийняти:  $T_1 \in [25; 50]$  Нм,  $\Delta T_1 = 5$  Нм;  $T_2 \in [15; 30]$  Нм;  $\Delta T_2 = 2,5$  Нм;  $J_1 \in [0,01; 0,1]$  кгм<sup>2</sup>;  $\Delta J_1 = 0,01$  кгм<sup>2</sup>;  $J_2 \in [0,03; 0,1]$  кгм<sup>2</sup>;  $\Delta J_2 = 0,01$  кгм<sup>2</sup>.

За нульові значення досліджуваних параметрів прийнято [7]:  $T_1 = 48,6$  Нм;  $T_2 = 22,1$  Нм;  $J_1 = 0,023$  кгм<sup>2</sup>;  $J_2 = 0,062$  кгм<sup>2</sup>;  $C_{12} = 1940$  Нм/рад.

Результати розрахунків величини максимального моменту, що виникає під час пуску машини представлені на графіках (рис. 2).

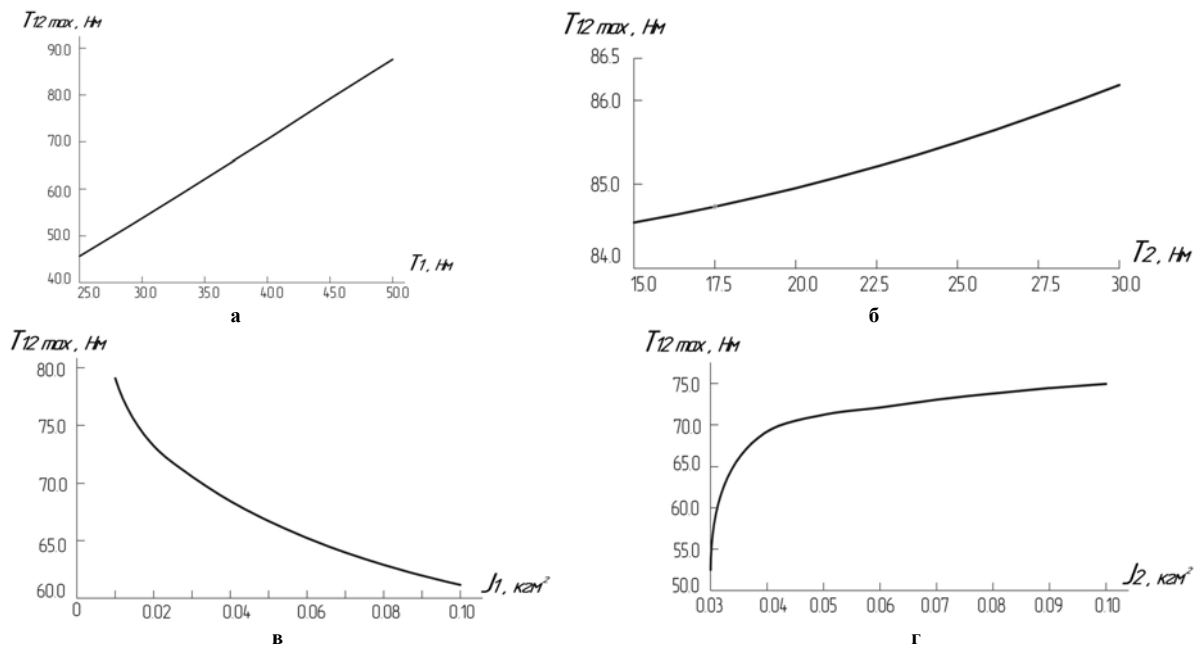


Рис. 2. Графік впливу параметрів ПЗДН при використанні його в приводі в'язальної машини КО-2 на величину пускових динамічних навантажень:  
а -  $T_{12\max} = f(T_1)$ ; б -  $T_{12\max} = f(T_2)$ ; в -  $T_{12\max} = f(J_1)$ ; г -  $T_{12\max} = f(J_2)$

Одержані результати показують, що на пускові динамічні навантаження круглов'язальної машини КО-2 суттєво впливають пусковий момент ПЗДН та його момент інерції. Також встановлено, що одержаний висновок справедливий при використанні ПЗДН в приводі будь-якої в'язальної машини або автомата.

Дослідження авторів [2-3] показує, що для зниження пускових динамічних навантажень в в'язальних машинах та автоматах доцільно використовувати ПЗДН, що створюють попереднє (перед пуском) навантаження пружних в'язей привода.

В цьому разі величина пускових навантажень  $T'_{12\max}$  може бути одержана аналогічно виразу (13):

$$T'_{12\max} = \sqrt{A_{12}^{\prime 2} + B_{12}^{\prime 2}} + a' . \quad (16)$$

Враховуючи початкові умови пуску системи з попередньо напруженими в'язями привода  $T_{(12)0} = T_2; \dot{T}_{(12)0} = 0$  та (12), знаходимо:

$$A'_{12} = T_2 - T'_1 = 22,1 - 26,52 = 4,42 \text{ Нм}; \quad B'_{12} = 0; \quad a' = 25,32 \text{ Нм}, \quad (17)$$

де  $T'_1 = 1,2T_2 = 26,52 \text{ Нм}$  (враховано, що ПЗДН при попередньому напруженні пружних в'язей привода, що досягається вмиканням електродвигуна і, як правило, електромагнітної фрикційної муфти [1-4] та подальшому пуску машини зменшує пусковий момент електродвигуна).

Підставивши (17) в рівняння (16) знаходимо:  $T'_{12\max} = 29,74 \text{ Нм}$ .

При звичайному поетапному пуску круглов'язальної машини КО-2 без ПЗДН  $T_{12\max} = 85,17 \text{ Нм}$ .

Таким чином, наявність в приводі круглов'язальної машини КО-2 ПЗДН, що створює попереднє напруження пружних в'язей привода, зменшує пускові динамічні навантаження в 2,86 рази.

### Висновки

Аналізуючи результати досліджень, можемо зробити наступні висновки:

- запропонований метод динамічного аналізу привода в'язальної машини або автомата дозволяє оперативно вирішувати питання знаходження динамічних навантажень, що виникають в приводі під час пуску;
- найбільш ефективним засобом зниження динамічних навантажень в приводі в'язальних машин та автоматів є використання в його складі пристрою зниження динамічних навантажень (ПЗДН);
- під час розробки конструкцій ПЗДН, в першу чергу, слід ставити до них наступні умови: можливість знижувати пускового моменту електродвигуна; можливість збільшувати момент інерції ведучої маси привода; можливість попереднього напруження пружних в'язей привода з подальшим обмеженням пускового моменту електродвигуна.

### Література

1. Хомяк О.Н. Повышение эффективности работы вязальных машин / О.Н. Хомяк, Б.Ф. Пипа. – М. : Легпромиздат, 1990. – 208 с.
2. Пипа Б.Ф. Динаміка круглов'язальних машин / Пипа Б.Ф., Хомяк О.М., Павленко Г.І. – К. : КНУТД, 2005. – 294 с.
3. Хомяк О.М. Динаміка плосков'язальних машин та автоматів / Хомяк О.М. – К. : КНУТД, 2008. – 250 с.
4. Чабан В.В. Динаміка основов'язальних машин / Чабан В.В., Бакан Л.А., Пипа Б.Ф. – К. : КНУТД, 2012 – 287 с.
5. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / Кожевников С.Н. – К. : Наукова думка, 1986. – 288 с.
6. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами / Голубенцев А.Н. – М. : Машгиз, 1959. – 306 с.
7. Машины кругловязального типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы, 1992. – 86 с.

### References

1. Khomyak O. N., Pipa B. F. The efficiency increase of knitting machines. M.: Lespromizdat, 1990. 208 p.
2. Pipa B. F., Khomyak O. M., Pavlenko G.I. Dynamics of circular knitting machines. K.: KNUVD, 2005. 294 p.
3. Khomyak O. M. Dynamics of planar knitting machines and automates. K.: KNUVD, 2008. 250 p.
4. Chaban V. V., Bakan L. A., Pipa B. F. Dynamics of frame knitting machines. K.: KNUVD, 2012. 287 p.
5. Kozhevnikov S. N. Dynamics of non-stationary processes in machines. K.: Naukova Dumka, 1986. 288 p.
6. Golubentsev A. N. The dynamics of transition processes in machines with many masses. M.: Motor Cycle", 1959. 306 p.
7. Circular knitting machines of the CO-2 type. Technical description and operating instructions. Chernivtsi, 1992. 86 p.

Рецензія/Peer review : 22.1.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Місяць В.П.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ВІБРОАРМОВАНОЇ ЗОНИ ЗУБКІВ ШАРОШОК БУРОВИХ ДОЛІТ

В роботі визначено шляхи дослідження віброармованого композиційного матеріалу «хромонікелева сталь – реліт» для заготовок зубків шарошок бурових доліт. Потенційні механічні властивості такого композиційного матеріалу залежать від багатьох факторів, зокрема, від концентрації та грануляції арматорів у армованій робочій зоні зубка. Обґрунтувавши та визначивши середню віддаль між арматорами в матриці композиційного матеріалу, можемо отримати конкурентноздатний зубок бурового інструменту з метою підвищення його довговічності, оскільки литі композиційні матеріали на сталій металозв'язці мають для досягнення цієї мети широкі можливості.

*Ключові слова:* композиційний матеріал, матриця, арматор, зубок, шарошка, буровий інструмент

L.D. PITULEI, R.T. KARPYK

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

### THE STUDY OF OBTAINING OPTIMAL STRUCTURE FOR THE VIBRATION REINFORCEMENT AREA OF THE ROLLER BITS OF DRILLING BITS

**Abstract** - The article studies the use of vibration reinforced composite material chrome-nickel steel — relit of a roller bit blank of the drilling bit. Potential mechanical properties of this composite material depend on many factors, including concentration and granulation of the reinforcement devices in the reinforced working area of the bit.

After justifying and determining the average distance between reinforcement devices in the matrix of the composite material, we can obtain a competitive bit of the drilling tool in order to increase their durability since cast composite materials on a metal-on-metal bundle have a wide range of features to achieve this goal.

Mechanical properties of the vibration reinforced drilling tool chrome-nickel steel — relit, depending on the concentration and granulation of the reinforcement devices, demonstrate potential features laid in its structure, which allows to use it for producing bits of the roller drilling bit to drill rocks of various hardness]. Since parameters of the vibration effect on the melt can be changed greatly, vibration reinforcement of the composite bit has a wide range of features for this.

**Keywords:** composite material, matrix, reinforcement device, bit, roller bit, drilling tool.

#### Вступ

Основний об'єм буріння свердловин різного призначення в нафтогазовидобувній промисловості України здійснюється шарошковими буровими долотами. Зменшити використання дефіцитних твердих сплавів на основі вольфраму та кобальту можна завдяки локальному об'ємному армуванню лише робочої, виступаючої над тілом шарошки, частини вставного зубка твердим сплавом [1]. Скупчення твердого сплаву в об'ємі робочої частини і практично його відсутність у державці дозволить майже на 70% зменшити витрати дефіцитного та дорогого матеріалу вставного зубка. Перспективним напрямком технологічного забезпечення довговічності бурового інструменту є використання зносостійких композиційних матеріалів на сталій металозв'язці для зубків шарошок бурових доліт шляхом віброармування їх робочої частини [2].

#### Експериментальна частина

Одним з критеріїв якості композиційного матеріалу зубка є обґрунтування вибору необхідної середньої віддалі між арматорами у віброармованій зоні [3]. Визначення середньої віддалі між арматорами в матриці є досить складною задачею як методичного характеру, так і математичного порядку. По-перше, складним питанням є формулювання самого поняття “середня міжарматорна відстань”. Так, якщо нею вважати відстань до найближчого арматора для кожного арматора, то це може привести до досить хибних висновків про рівномірність розподілу твердого сплаву реліт у хромонікелевій сталій металозв'язці.

За алгоритмом “найближчого сусіда” середня міжарматорна відстань буде дорівнювати  $h_0$ , хоча арматори і розміщені на відстані, більшій, ніж  $2h_0$  (рис. 1а). Це пов'язано з тим, що такий алгоритм доволі часто попарно “зв'язує” найближчі арматори, ігноруючи при цьому нерівномірність розподілу в інших напрямках [4].

Тому за критерій прийнято алгоритм “чотири сусіди” (рис. 1б).

Такий критерій має свій недолік: крайні (граничні) арматори будуть вносити похибку у розрахунки через відсутність “сусідів” в усіх напрямках. Тому граничні арматори можна використовувати лише як “сусідів”. Знаходження чотирьох найближчих “сусідів” для кожного арматора на шліфі вручну є дуже працеємким процесом. Для цього створена спеціальна програма розрахунку у середовищі програмування – Maple.

Вхідним параметром служить список координат центрів арматорів  $(x_i, y_i)$ . При цьому граничні арматори розміщують наприкінці списку. Створення програми автоматичного формування такого списку в принципі є можливим, але програмне забезпечення в даному випадку є питанням досить складним через проблему “розпізнавання образів” і потребує графічного програмного забезпечення, наприклад AutoCAD.

Тому створення списку відбувалось в інтерактивному режимі. Алгоритм програмних засобів Maple дозволяє провести визначення відстані між усіма арматорами методом перебору, їх сортування і підбору для кожного значущого арматора чотирьох найближчих “сусідів”. Усі відстані підсумовуються, визначається

середнє значення і середнє квадратичне відхилення.

Другою проблемою для визначення середньої відстані між арміторами є те, що немає дійсної просторової картини розподілу арміторів у матриці, а інформацію отримують через двомірні перерізи (шліфи). Це додає у визначення відстані між арміторами елемент ймовірності, який може значно вплинути на достовірність результатів розрахунку за попередньо наведеним алгоритмом, особливо при достатньо малих відстанях, співмірних із середнім діаметром арміторів  $d_a$  (рис.2).

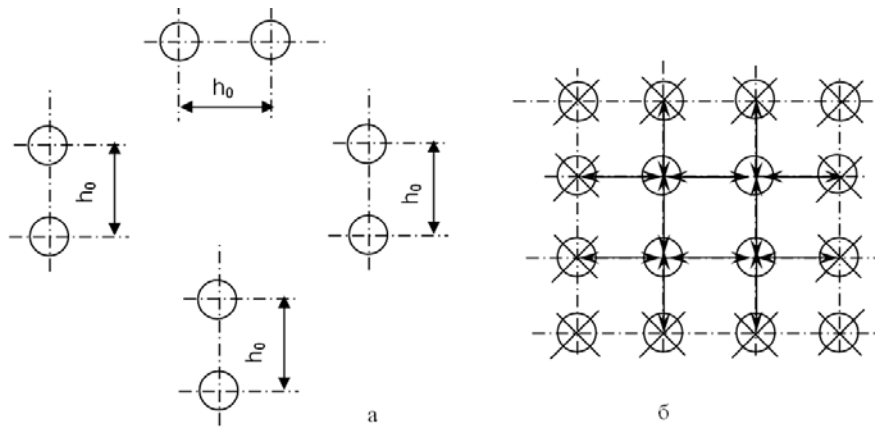


Рис.1. Приклад ймовірного розподілу арміторів в матриці:

○ - армітори, які підлягають розрахунку; ⊗ - армітори, які тільки є можливими „сусідами”

За наведеним алгоритмом відстань буде  $X$ , а насправді вона рівна середній дійсній віддалі

$$X_D = \sqrt{x^2 + (a_1 + v_1)^2} \tag{1}$$

Як бачимо, похибка збільшується при зменшенні відстаней між арміторами.

Розміщення арміторів у площині шліфа носить випадковий характер, тому для визначення відстані  $a_1 + v_1$  необхідно скористатися математичним апаратом теорії ймовірностей. Зрозуміло, що ймовірність для відстані  $h_0$  (чи  $x$ ) підлягає рівномірному розподілу в інтервалі  $(-d_a/2; d_a/2)$ .

Для визначення середньої дійсної відстані  $X_D$  необхідно знайти суму відстаней  $a_1$  і  $v_1$ , які є незалежними величинами, що підлягають рівномірному розподілу.

Для спрощення розрахунків будемо вважати, що розподіл величин  $h_0$  і  $v_1$  рівномірний від 0 до  $d_a$  (по осі  $X$ ). В такому випадку досить просто довести, що ймовірність отримання відстані  $X$  між сусідніми арміторами буде:

$$P(X) = \frac{1}{D^2} (2DX - X^2), \tag{2}$$

де  $X \in [0; d_a]$ .

Тому математичне очікування:

$$M(X) = \int_0^{d_a} XP(X)dx = \frac{2}{d_a^2} \left( \frac{d_a \cdot X^2}{2} \Big|_0^{d_a} - \frac{X^3}{3} \Big|_0^{d_a} \right) = \frac{1}{3} d_a. \tag{3}$$

Отриманий результат підставляємо у формулу (1) для визначення середньої дійсної відстані:

$$X_D = \sqrt{X_{розр}^2 + \left(\frac{d_a}{3}\right)^2} \tag{4}$$

Рівномірність розподілу визначається за середньою квадратичною відстанню та коефіцієнтом варіації. В даному випадку коефіцієнт варіації  $\delta \approx 0,2$ . За коефіцієнтом варіації та гістограмами розподілу можна зробити висновок про оптимальну рівномірність розподілу арміторів у віброармованій зоні композиційного зубка з об'ємною концентрацією  $\phi = 0,66$ .

В результаті макроскопічних досліджень шліфів віброармованих зубків в їх поперечному і в повздовжньому перерізах (рис. 3а, б) виявлено рівномірний розподіл литого карбіду вольфраму у хромонікелевій сталійній металозв'язці (рис.3 в).

Основною зоною, яка визначає якість композиційних зубків, є армована зона, механічні характеристики якої в основному залежить від об'ємної концентрації та розмірів арміторів, а також віддалей між ними.

Теоретично обґрунтувавши та встановивши аналітичні залежності оптимальних розмірно-структурних умов міцності та пластичності віброармованого матеріалу зубків шарошок бурових доліт для конкретних умов буріння можна досягнути підвищення довговічності бурового інструменту в цілому.

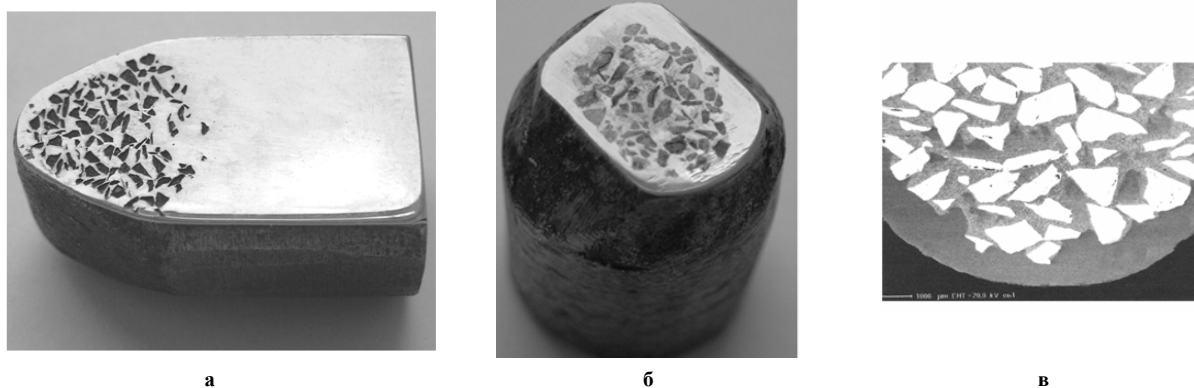


Рис. 3. Вплив просторового розміщення арміторів на відстань між ними: а – у поперечний переріз; б – повздовжній переріз; в – розподіл литого карбіду вольфраму в металозв'язці

Мікроструктуру матеріалу віброармованої зони заготовки досліджено на основі аналізу хімічного складу елементів шліфа за висотою зуба. На всій площі шліфа рівномірно по висоті армованої зони вибрано десять елементарних площ, які представляють собою площі сканування 1мм x 4 мм, де проведено кількісний рентгеноспектральний аналіз. Концентрацію основних хімічних елементів в площях сканування шліфа представлено в табл.1.

Таблиця 1

#### Концентрація основних хімічних елементів в площях сканування шліфа зубка

Вміст елемента, % (мас)										
Елементи	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>	c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub>	c <sub>8</sub>	c <sub>9</sub>	c <sub>10</sub>
W	1,826	3,534	4,463	12,07	18,450	36,427	31,369	32,393	34,564	2,446
Fe	92,206	91,583	89,536	84,536	79,510	60,304	65,195	64,262	60,876	83,811
Si	0,750	0,494	0,645	-	-	0,193	0,456	0,146	-	9,296
Mo	0,514	0,036	0,443	0,438	0,112	0,285	-	0,428	1,368	0,323
Cr	0,897	0,744	0,872	0,694	0,203	0,469	0,530	0,472	0,559	0,683
Mn	1,034	1,071	0,996	0,664	0,563	0,590	0,724	0,650	0,766	0,801
Ni	2,774	2,538	3,046	1,694	1,160	1,733	1,727	1,645	1,866	2,645

#### Висновки

Фізико-механічні властивості віброармованого композиційного матеріалу „хромонікелева сталь – реліт” залежно від концентрації та грануляції арміторів демонструють потенційні можливості, які закладені в його структурі, що дозволяє використовувати його для виготовлення зубків шарошок бурових доліт для розбурювання гірських порід різної твердості. Так як параметри вібраційної дії на розплави можна змінювати на багато порядків, то віброармування композиційних зубків має для цього широкі технологічні можливості.

#### Література

1. Буровое оборудование : справочник : в 2 т. Т. 2: Буровой инструмент / [Абубакиров В.Ф., Буримов Ю.Г., Гноевых А.Н. и др.]. – М. : Недра, 2003. – 494 с.
2. Затуловский С.С. Литые композиционные материалы / С.С. Затуловский. – К. : Техника, 1990. – 240 с.
3. Ганиев Р.Ф. Динамика частиц при воздействии вибрации / Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. – К. : Наук. думка, 1975. – 167 с.
4. Крижанівський Є.І. Вплив вібрації на кристалічну структуру долотної сталі / Є.І. Крижанівський, Л.Д. Пітулей, Д.І. Феденчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – № 3(12). – С. 26–30.

#### References

1. Abubakirov V.F., Burimov Y.G., Gnoevy'kh A.N. Burovooe oborudovanie: spravochnik v 2 t. Vol. 2. Moscow, Nyodra, 2003, 494 p.
2. Zatulovskij S.S. Lity'e kompozicionny'e materialy'. Kyiv, Tekhnika, 1990, 240 p.
3. Ganiev R.F., Ukrainskij L.E. Dinamika chasticz pri vozdejstvii vibracii. Kyiv, Naukova dumka, 1975, 167 p.
4. Kryzhanivskiy Y.I., Pitulei L.D., Fedenchuk D.I. Vplyv vibratsii na krystalichnu strukturu dolotnoi stali, Naukoviy visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho universytetu nafty i hazu, 2005, No.3 (12), pp. 26-30.

Рецензія/Peer review : 27.1.2015 р.

Надрукована/Printed : 25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Панчук В.Г.

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИМАЛЬНОГО ВІДБОРУ  
ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ БУРІННЯ**

*В статті запропонований розв'язок задачі вибору діапазону квантування за рівнем технологічних параметрів процесу буріння. Запропоновано обґрунтування часу формування коду інформаційного стану процесу буріння, що базується на дотриманні ряду системних вимог, а також умов неадаптивності та паралельності процедур відбору інформації на буровій, що дозволяють рекомендувати оптимальний інтервал часу формування кадру ідентифікації інформаційного стану технологічного процесу буріння рівним 2.3 с.*

*Ключові слова: технологічні параметри процесу буріння, дискретизація, квантування, код інформаційного стану, діапазон квантування.*

T.A. VAVRYK, G.I. LEVYTSKA, I.R. MUHAJLUK  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**DETERMINE THE OPTIMAL PARAMETERS OF INFORMATION SELECTION  
IN INFORMATION SYSTEMS OF DRILLING**

*Abstract – The problem to choose parameters for information sampling and quantization is a challenging and time-consuming theoretical and algorithmic task. Known methods for selecting sampling step are not effective enough to justify the sampling parameters in specific circumstances, particularly in information systems of drilling industries.*

*Solution of task of selection range of quantum on the level of technological parameters of drilling process is offered in the article. The ground of time of code forming of the informative state of the drilling process, that is based on observance of some system requirements, and also terms of non-adaptiveness and parallelism procedures of selection the information on chisel to recommend an optimum interval of time of forming the shot of identification the informative technological process of drilling equal 2.3 s. is described.*

*Keywords: technological parameters of the drilling process, digitization, quantum, code of the informative state, a range of quantum.*

**Вступ**

Дослідження кореляційних і структурних функцій технологічних параметрів буріння за різних інформаційних станів бурової установки для різних регіонів показують значний рівень не стаціонарності статистичних характеристик. Тому відомі методи вибору кроку дискретизації недостатньо ефективні для обґрунтування параметрів дискретизації в конкретних умовах, тому що засновані на моделях стаціонарного випадкового процесу.

Обґрунтування вибору параметрів дискретизації і квантування інформації є однією з складних і трудомістких теоретико-алгоритмічних задач. Методологічно для вибору параметрів дискретизації та квантування квазістаціонарних процесів вибирається завідомо завищений крок дискретизації. Це в середньому на порядок вище інтервалу кореляції найбільш динамічних параметрів при похибці вимірювання 1%, що також на порядок підвищує необхідну точність при статистичних розрахунках [1].

**Вибір параметрів дискретизації та квантування інформації в інформаційних системах буріння**

Основою для аналізу метрології дискретизації і квантування інформації в інформаційних системах буріння (ІСБ) служить методика і методологічні прийоми формування повідомлень для квазістаціонарних джерел інформації [2].

В табл. 1 подана інформація про діапазон зміни технологічних процесів буріння, отриманих в реальному масштабі часу, максимальний розмір, потрібний при їх цифровому відображенні, а також допустима похибка вимірювання.

Розв'язок задачі вибору діапазону квантування по рівню технологічних параметрів процесу буріння пов'язано з необхідністю, що задовольняє системним вимогам:

- забезпечення метрологічної відповідності діапазону квантування кожного параметру з класом точності первинного перетворювача комплексу контролю процесу буріння;
- облік параметрів, які застосовуються для обробки даних на буровій установці;
- облік способу кодування і представлення результатів вимірювання в цифровому виді персоналу бурової;
- облік способу представлення кодів для реєстрації даних на ПЕОМ;
- облік параметрів процедур обробки інформації в реальному масштабі часу.

Клас точності датчиків контролю технологічних процесів буріння не перевищує 2.5, що відповідає точності дозволу і не перевищує 64 рівня квантування. При передачі телеметричної інформації аналоговим способом допускається клас точності 4.0, що не перевищує 32 рівні квантування. Для забезпечення метрологічних вимог, використаних при повірці приладів, похибка вимірювання взірцевого приладу повинна бути не менш, ніж в три рази менша похибки приладу, який підлягає повірці. Відомо, що помилка вимірювання цифрових приладів не перевищує одного рівня квантування. Тому діапазон квантування технологічних процесів буріння повинен бути не меншим 256 рівнів квантування (8 біт) для передачі телеметричної інформації і не менше 1024 рівнів квантування (10 біт) для відображення і обробки даних на буровій.



## Діапазон зміни та допустима похибка виміру технологічних параметрів буріння

№ пп	Назва показників	Індикація	Максимальний розмір	Похибка вимірювань
1	Навантаження на гак(вага інструменту)	0-250	999	0.1
2	Навантаження на долото	40-0-10	999	0.1
3	Момент на роторі (ключі)	0-60	999	0.1
4	Розхід на вході, $Q_{вх}$	0-100	99	1.0
5	Розхід на виході, $Q_{вих}$	0-100	99	1.0
6	Тиск на маніфольді	0-400	999	0.1
7	Число подвійних ходів (1-й насос), $N_1$	0-150	999	0.1
8	Число подвійних ходів (2-й насос), $N_2$	0-150	999	0.1
9	Рівень (1-а ємність), $H_1$	40-200	999	0.1
10	Рівень (2-а ємність), $H_2$	4-200	999	0.1
11	Густина на вході, $\rho_{вх}$	0-260	999	0.1
12	Густина на виході, $\rho_{вих}$	0-260	999	0.1
13	Температура на вході, $t_{вх}$	0-100	99	1.0
14	Температура на виході, $t_{вих}$	0-100	99	1.0
15	Вмістиме газу, $W$	0-100	99	1.0
16	Оберти ротора, $n$	0-300	999	0.1
17	Проходка	0-200	99	1.0
18	Глибина свердловини	0-9000	9999	0.01
19	Механічна швидкість	0-100	99	1.0
20	Загальне число обертів ротора	0-10000	9999	0.01
21	Число циклів роботи талевого канату	0-1000	999	0.1
22	Диференційний розхід	0-100	99	1.0

В даний час існує широкий клас аналого-цифрових приладів (АЦП) в мікросхемному використанні, що забезпечують діапазон квантування уніфікованих вихідних сигналів датчиків в межах 5–16 двійкових розрядів. При вбудуванні автономного АЦП в кожний сигнал легко реалізується принцип одночасності вимірювання, паралельності обробки інформації в кожному каналі, мобільності каналів та підвищення надійності інформаційно-вимірювальних систем в цілому. Для спрощення алгоритмів ідентифікації інформаційного стану процесу буріння доцільно використання АЦП, що забезпечують формування вихідних кодів з наступними параметрами [3]:

- унітарні коди або послідовні двійково-десяткові коди середніх значень технологічних параметрів, представлених в дійсних одиницях для відображення процесу буріння в цифровій формі з числом рівнів квантування, що не перевищує 1024 [4];
- унітарні коди параметрів для статистичного кореляційного аналізу процесу буріння в реальному масштабі часу з діапазоном квантування, що не перевищує 16 рівнів [5];
- послідовні двійкові коди немасштабних уніфікованих сигналів датчиків з числом рівнів квантування не більше 256 [6].

Для обміну даних в рамках буріння, а також організації діалогу з операторами термінальних пунктів управління на рівні бурової, потрібна видача інформації про технологічний процес в стандартному коді. В розглянутому випадку необхідно 3 байти для представлення одного відліку телеметрії або 3 чотири розрядних двійково-десяткових коди [2].

Квазістаціонарні процеси можуть мати такі типи нестационарності:

- 1) за математичним сподіванням  $M_x(i)$ ;
- 2) за дисперсією  $D_x(i)$ ;
- 3) за спектральною функцією  $S_{x\omega}(i)$ , де  $i = 1, 2, 3, \dots$  – дискретна ознака поточного часу.

Введемо поняття характеристичного параметру  $\lambda$ , який є зручною оцінкою втрати повідомлень, зумовлений дискретизацією процесу. Якщо відома нормована автокореляційна функція процесу  $R_{xx}(i)$ , то значення  $\lambda$  можна визначити залежністю

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\Delta\xi} \sqrt{1 - R_{xx}(i)}, \quad (1)$$

де  $\Delta\xi = \frac{\Delta x}{\tau}$  – приведена (нормована) величина запасу норми;  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$  – приріст поточної ординати по відношенню до попередньої в інтервалі дискретизації;  $\tau$  – середньоквадратичне відхилення

контрольного параметру.

На основі формули (1), коли відома нормована автокореляційна функція  $R_{xx}(i)$  чи хоча б її початкова віддаль, при витримуванні допустимої похибки вимірювання можна знайти значення  $\Delta t_{don}$  – допустимого кроку дискретизації, як абсцису перетину графіка  $R_{xx}(i)$  з прямою, паралельною осі абсцис, віддаленої від дотичної  $R_{xx}(i)$  на величину  $0,045\Delta x^2$ .

Розглянемо перший випадок, коли параметри процесу мають такі типи:

$$M_x(i) = \text{var}; D_x(i) = \text{const}; S_{x\omega}(i) = \text{const}.$$

На рис.1 представлена залежність зміни навантаження на долото для трьох найбільш типових ділянок технологічного процесу по 300 дискретних звітів в кожному. На рис.2 представлені залежності їх нормованих автокореляційних функцій. Враховуючи, що графіки представлених замірів технологічних параметрів процесу буріння виконувались з діаграм само пишучих приладів бурової установки, потрібна була фільтрація процесів від високочастотних складових. Фільтрація необхідна перш за все тому, що вібрації установки буріння і всього обладнання, що знаходяться на ній, приводять до викривлення записів самописців.

Для квазістаціонарних процесів, статистичні характеристики яких поволі змінюються в часі, час дискретизації  $\Delta t_{\text{max}} = 1.7\Delta t_{don}$ . Перевищення значення  $\Delta t_{\text{max}}$  не бажано, так як це призводить до швидкого зросту втрачених повідомлень, зумовлених дискретністю централізованого контролю. Тоді для параметру – навантаження на долоті при заданому кроці квантування  $\delta = 0.045 \Delta x^2 = 0.0449$  для першої “#”, другої “\*” та третьої “+” ділянок процесу буріння кроки дискретизації складають 4.54 с, 5.45 с, 3.81 с (рис.2).

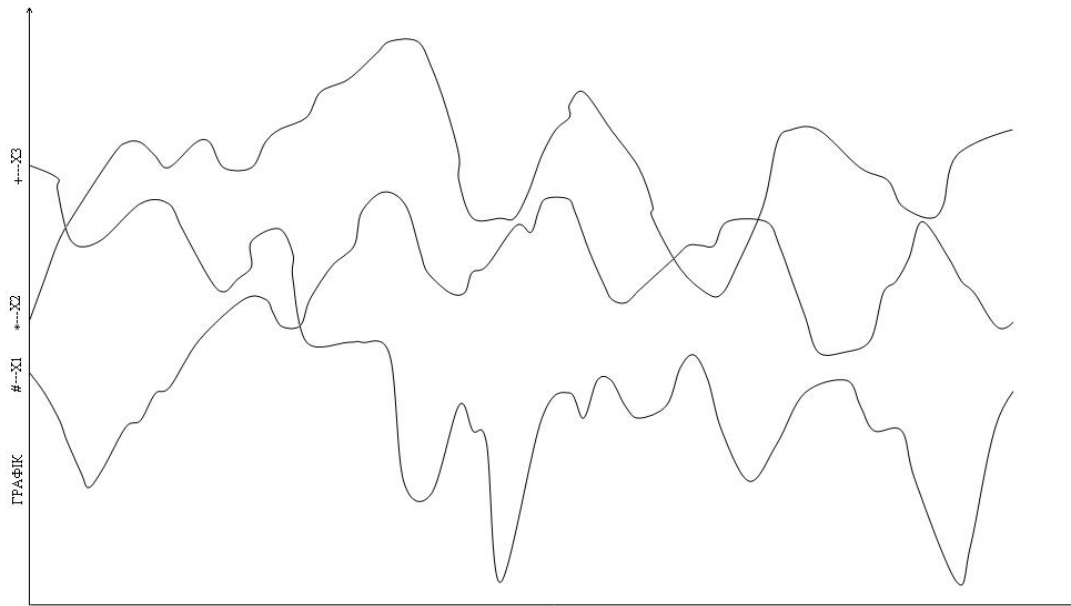


Рис. 1. Графік реалізації навантаження на долоті

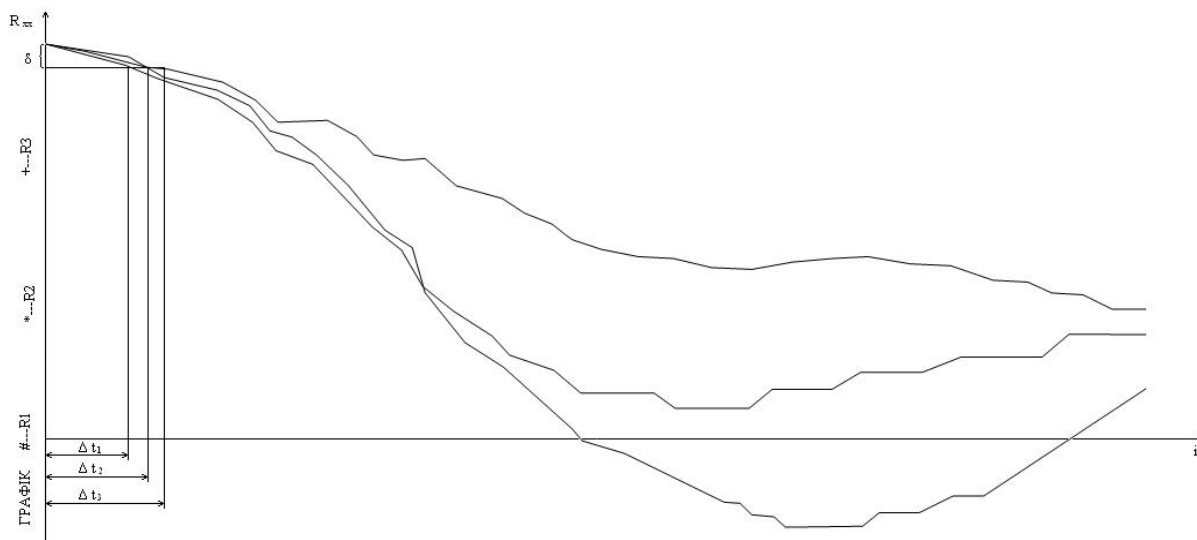


Рис. 2. Графік функцій автокореляції на долоті

Розглянемо другий випадок, коли процес має наступні типи нестационарності:

$$M_x(i) = \text{const}; D_x(i) = \text{var}; S_{x\omega}(i) = \text{var}.$$

Для аналізу на рис.3 вибрана реалізація технологічного процесу буріння, що представляє момент на трубах. Реалізація характеризується нестационарністю другого типу. Розраховані значення нормованої автокореляційної функції для трьох ділянок технологічного процесу представлені на рис.4. Часові інтервали дискретизації для кожного з ділянок складають 2.04 с, 3.23 с, 1.02 с.

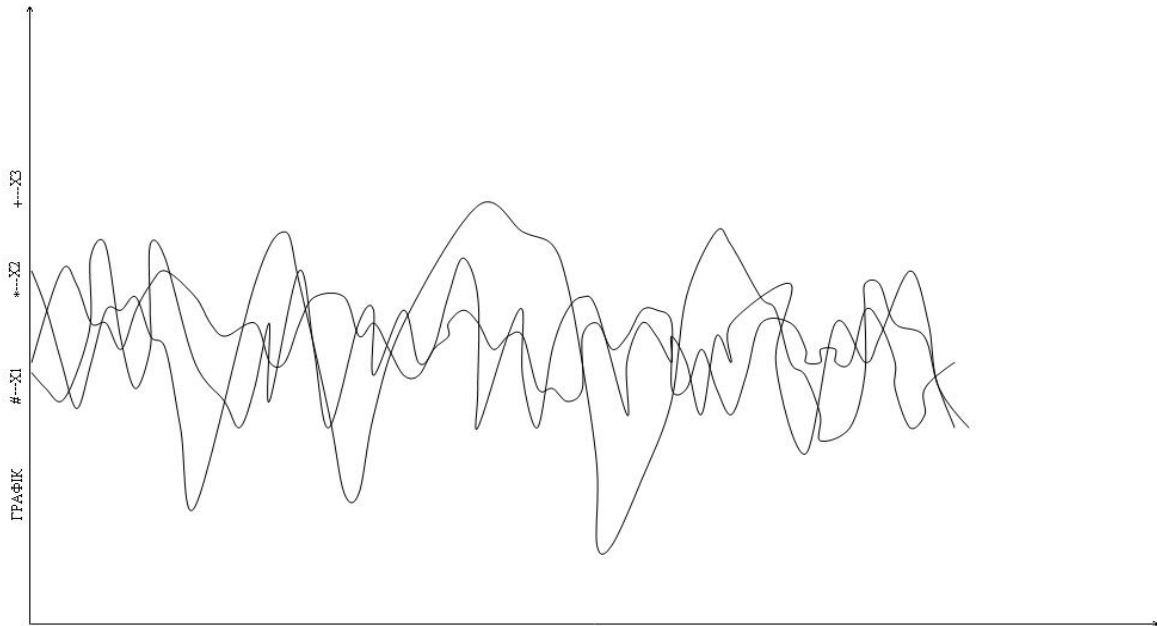


Рис. 3. Графік реалізації моменту на зубах

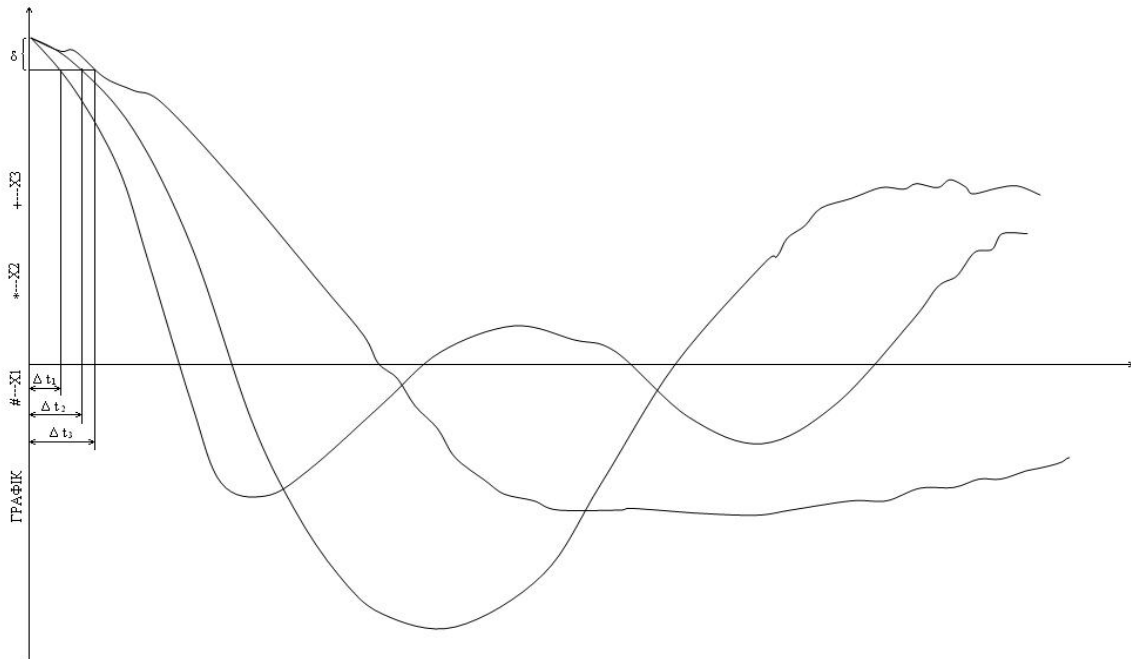


Рис. 4. Графік функцій автокореляції моменту на зубах

На рис.5 показано поведінку технологічного параметру тиску на маніфольді для трьох найбільш типових ділянок, якщо

$$M_x(i) = \text{var}; D_x(i) = \text{var}; S_{x\omega}(i) = \text{var}.$$

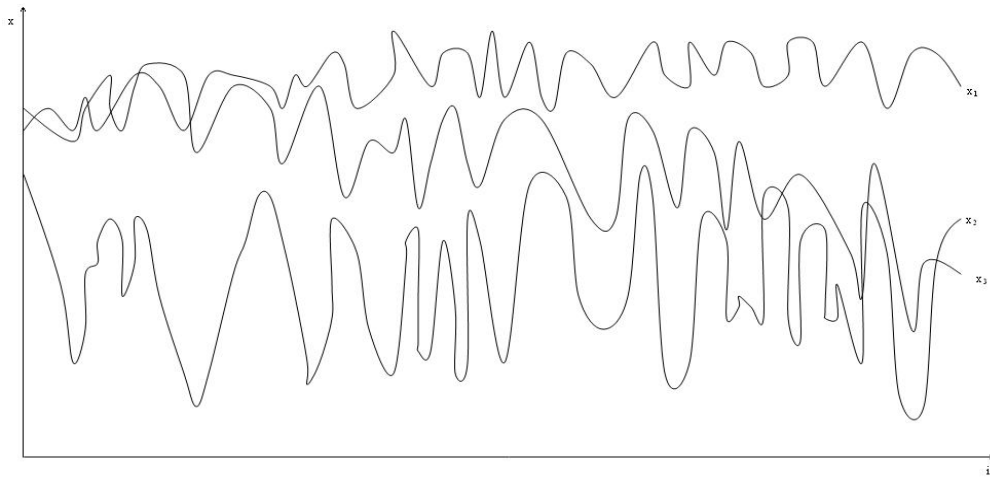


Рис. 5. Графік реалізації тиску

Крок дискретизації (рис.6) при заданому рівні квантування  $\delta$  рівний 1.36 с, 4.42 с, 1.53 с .

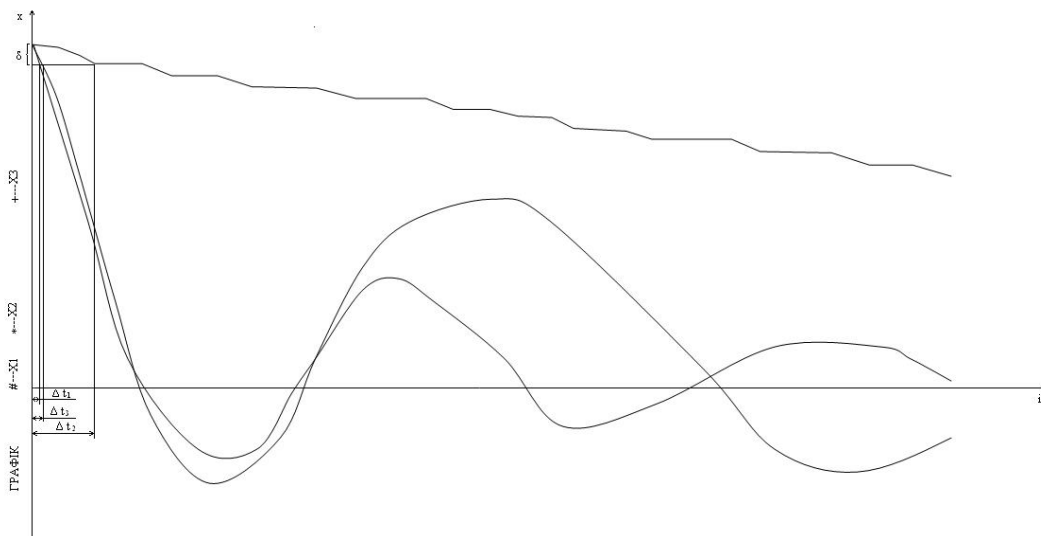


Рис. 6. Графік функції автокореляції тиску

Для параметру буріння – розхід бурової рідини (рис.7) параметри статистичних моментів представлені як

$$M_x(i) = const; D_x(i) = const; S_{x\omega}(i) = var.$$

Крок дискретизації (рис.8) для кожної з ділянок відповідно рівний 5.61 с, 2.38 с, 4.0 с .

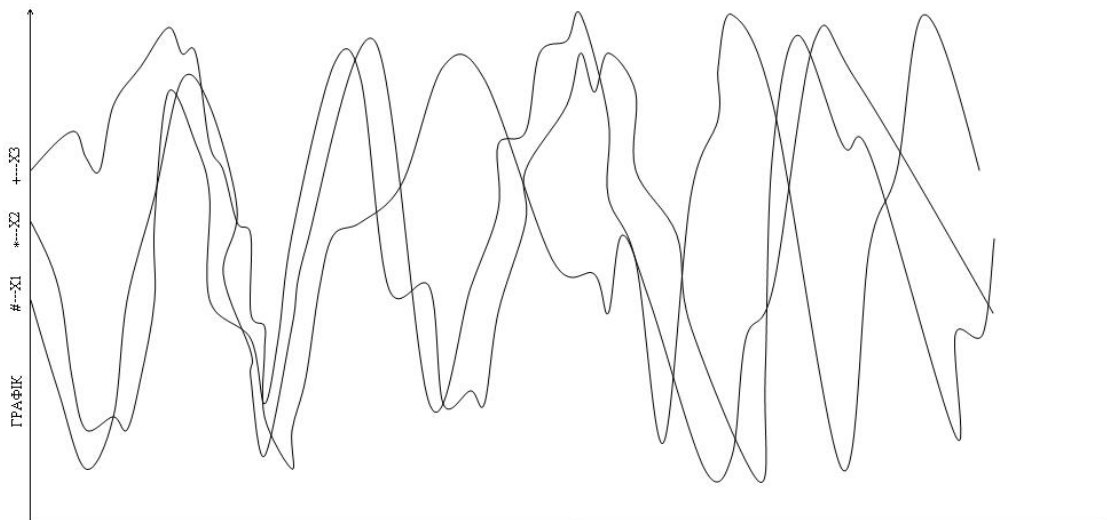


Рис. 7. Графік реалізації витрати бурової рідини

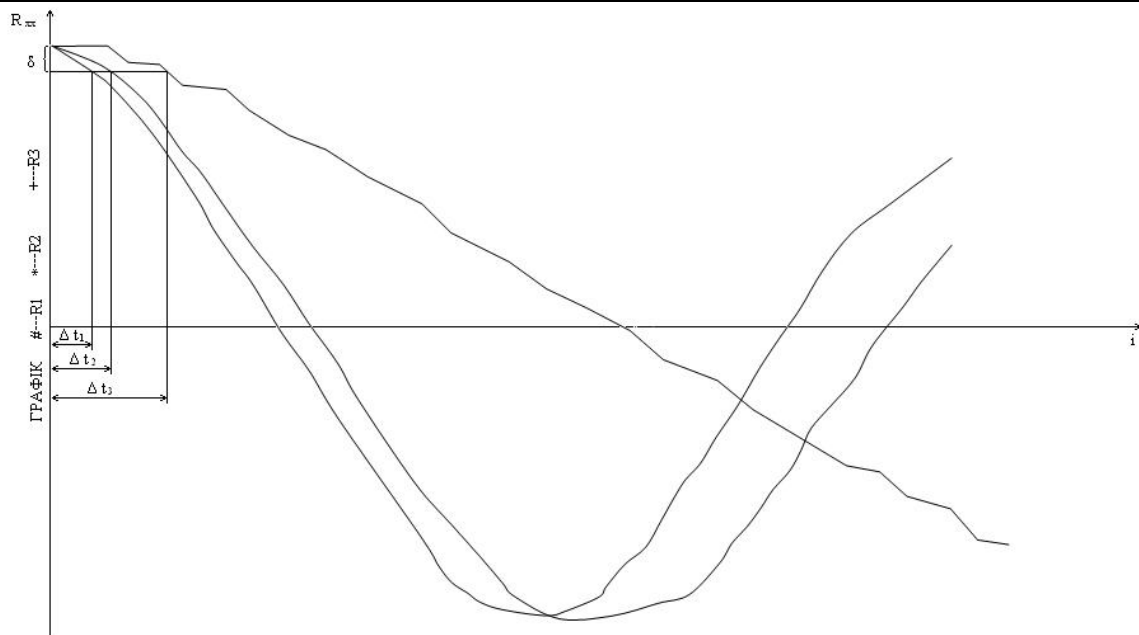


Рис. 8. Графік функції автокореляції витрати бурової рідини

Значна різноманітність динамічності окремих груп технологічних параметрів процесу буріння не дозволяють визначити конкретно рекомендовані параметри дискретизації в часі процесів буріння.

Задача вибору параметрів дискретних процесів буріння для ідентифікації інформаційного стану бурової установки повинна розв'язуватись за допомогою ПЕОМ, так як відсутність процедур фільтрації перешкод високої частоти на цій стадії приводить до підвищення частоти дискретизації більше, ніж на порядок.

Іншими системними задачами, які впливають на конкретні параметри технологічних параметрів являються:

- вибір числа каналів інформаційно-вимірювальних систем;
- пропускна здатність по швидкодії і передачі інформації;
- обчислювальні ресурси алгоритмів даних.

Інтервал дискретизації процесів буріння повинен також узгоджуватись з пропускною здатністю оператора і його часом реакції на візуально представлені в цифровому виді дані.

Таким чином, обґрунтування вибору параметрів дискретизації процесів буріння можна звести до трьох випадків:

1. Обґрунтування інтервалу дискретизації для кореляційної обробки процесів буріння в реальному масштабі часу.
2. Вибір інтервалу дискретизації для представлення даних оператору.
3. Визначення кроку дискретизації для формування кадру ідентифікуючого інформаційного стану бурової установки.

Виходячи з вимог точності кореляційного аналізу, частота дискретизації випадкового процесу, що аналізується, повинна на 1–2 порядок перевищувати частоту, що визначається по інтервалу кореляції [2]. Враховуючи, що інтервал кореляції найбільш динамічних параметрів технологічного процесу буріння знаходиться в межах 4–8 с, шуканий параметр для розгляданого випадку повинен знаходитись в межах 10–25 Гц [3]. При інформаційній потужності відліку 0,5 байт це призведе до швидкості створення повідомлення 40–100 біт/с.

Результати досліджень психологічно сумісної частоти наданих даних оператору показує, що вона знаходиться в межах 1,8–2,6 с. В інформаційно-вимірювальних системах буріння найбільш раціональним потрібно вважати інтервали дискретизації 2 с, 2,4 с та 2,5 с, що відповідає представленню оператору 30, 25 та 24 повідомлення в хвилину [3]. При інформаційній потужності відліку 12 біт, швидкість створення повідомлень знаходиться в межах 5–6 біт/с.

Обґрунтування часу формування кадру інформаційного стану процесу буріння потрібно засновувати на наступних системних вимогах:

- кадр, який ідентифікує інформаційний стан процесу буріння, повинен використовуватись оператором після передачі на диспетчерський пункт управління в якості візуального повідомлення значень цифрових відліків параметрів, що контролюються;
- інформація кадрів, які зберігаються в пам'яті ПЕОМ після інтерполяції, повинна використовуватись для відновлення дискретних параметрів технологічного процесу буріння;
- інформаційні кадри повинні використовуватись для оперативного керування;
- результати статистичної обробки параметрів буріння повинні надаватись з інтервалом дискретизації, узгодженим з інтервалом кореляції найбільш динамічного параметра, для здійснення

коректування параметрів інформаційної моделі процесу буріння та видачі керуючих сигналів цифровим регулятором.

Дотримання перерахованих вимог, а також умов неадаптивності та паралельності процедур відбору інформації на буровій дозволить рекомендувати в якості оптимального інтервалу часу інтервал формування кадру ідентифікації інформаційного стану технологічного процесу буріння, рівним 2.4 с. При цьому швидкість створення повідомлень визначається сумуванням швидкостей трьох інформаційних потоків: телеметричної інформації, коду інформаційного стану установки буріння та результатів статистичної обробки.

### Висновки

Проведений аналіз динаміки та статистичних властивостей технологічних параметрів буріння показує, що останні характеризуються квазістаціонарними властивостями, зумовленими повільними і стрибкоподібними змінами  $M_x(i), D_x(i), S_{x\omega}(i)$ . Це визначає динаміку зміни швидкості створення повідомлень дослідницьким джерелом інформації в межах 40–100 біт/с при внутрішній ентропії джерела порядку 6–20 біт/с. Одержані результати підтверджують доцільність реалізації на рівні бурової методом скорочення надлишку та концентрації повідомлень, вибір конкретних типів яких вимагає проведення більш глибоких досліджень.

### Література

1. Романенко А.Ф. Вопросы прикладного анализа случайных процессов / А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Сов.радио, 1986. – 255 с.
2. Николайчук Я.Н. Эффективное кодирование суточного рапорта бурового мастера для формализованного ввода в ЭВМ / Я.Н. Николайчук, В.Р. Процюк, Г.Я. Ширмовский // Экспресс-информация. Сер. Экономика и управление. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – Вып.7. – С. 29–33.
3. Корчагин И.Я. Использование метода аналогий в задачах распределения ресурсов и маршрутизации сообщений в массово параллельных вычислительных системах / И.Я. Корчагин // Вест. Хакасского гос. ун-та, – Абакан, 2003. – Вып. 5, Сер. 1. – С. 53–58.
4. Иванов Л.Н. Модели синтеза расписаний параллельных обслуживающих систем / Л.Н. Иванов, Ю.А. Мезенцев // Омский науч. вест., – Омск: Изд-во ОГТУ, 2006. – № 9(46). – С. 164–167.
5. Мезенцев Ю.А. Декомпозиционный метод решения одного класса задач оптимального проектирования / Ю.А. Мезенцев // Науч. вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – № 3(24). – С. 67–100.
6. Таджикибаев Т.М. Система диспетчерского телеконтроля и управления бурения скважин / Т.М. Таджикибаев, К.Д. Якубенков. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 44 с.

### References

1. Pomanenko A.F. Voprosy prykladnoho analyza sluchainykh ppotheccov / A.F. Pomanenko, H.A. Serphee. – M.: Sov.padyo, 1986. – 255 c.
2. Nykolaichuk Ya.N. Effektyvnoe kodyrovanye cutochnoho rapopta bupovoho mastepa dlia fopmalyzovannoho vvoda v EVM / Nykolaichuk Ya.N., Ppotsiuk V.P., Shypmovckiy H.Ya. // Eksppecc-ynfopmatsyia. – M.: VNYYOENH, 1986. – Ser. Ekonomyka y uppavljenje. Vyp.7. – C.29-33.
3. Korchahyn Y.Ya. Yspolzovanye metoda analohyi v zadachakh raspredeleniya resurov y marshrutyzatsyy soobshchenyi v massovo parallelnykh vychyslytelnykh systemakh / Y.Ya. Korchahyn // Vest. Khakasskoho hos. un-ta, – Abakan, 2003. – Vyp. 5, Ser. 1. – S. 53-58.
4. Yvanov L.N. Modely synteza raspysanyi parallelnykh obsluzhyvaiushchykh system / L.N. Yvanov, Yu.A. Mezentsev // Omskiy nauch. vest., – Omsk: Yzd-vo ONTU, 2006. – №9(46). – S.164-167.
5. Mezentsev Yu.A. Dekompozitsyonnyi metod resheniya odnogo klassa zadach optymalnoho proektyrovaniya. / Mezentsev Yu.A. // Nauch. vest. NHTU, – Novosybyrsk: Yzd-vo NHTU, 2006. – №3(24). – S. 67-100.
6. Tadzhybaev T.M. Sycstema dyspetchepckoho telekontpolia y uppavljenja bupeniya ckvazhyn / T.M. Tadzhybaev, K.D. Yakubenkov. – M.: VNYYOENH, 1985. – 44 c.

Рецензія/Peer review : 25.1.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.М. Юрчишин

## ВПЛИВ НОМІНАЛЬНО НЕРУХОМИХ ФРИКЦІЙНИХ КОНТАКТІВ НА ЧАСТОТИ ВІБРОАКУСТИЧНОГО ПОЛЯ МАШИНИ ТЕРТЯ

Експериментально досліджені зміни частотного спектру акустичної емісії машини тертя, пов'язані із зняттям нормального навантаження у номінально нерухомому фрикційному контакті, що входить до складу машини. Показано, що перехід у холостий режим сприяє каскадному транспорту енергії вихоро-хвильових збурень в інфразвукову ділянку спектру. Інтенсивність цих процесів спадає зі збільшенням дисбалансу роторної частини машини тертя. Натомість зростає концентрація енергії збурень у характерній високочастотній ділянці спектру.

Ключові слова: фрикційний контакт, віброакустичне поле, акустична емісія, спектр, вихоро-хвильові збурення, енергетичний каскад.

YU.P. ZASPA, A.L. VOZNYAK

Khmelnytsky National University

YU.I. SHALAPKO

University of Science and Technology in Bydgoszcz

## AN INFLUENCE OF NOMINALLY IMMOVABLE FRICTIONAL CONTACTS ON FREQUENCIES OF VIBROACOUSTIC FIELDS OF FRICTIONAL MACHINES

Experimentally investigated changes in the frequency spectrum of acoustic emission of friction machines associated with the removal of the normal load of nominally stationary frictional contact, which is the part of the machine. It is mentioned that the transition in idle mode facilitates cascading energy transport in vortex - wave disturbances in the infrasonic range section. The intensity of these processes decreases with increase of imbalance of the rotor quotient of the friction machine. But instead, the concentration of energy density perturbations in the typical high-frequency region of the spectrum increases.

**Keywords:** frictional contact, vibroacoustic field, acoustic emission, spectrum, vortex-wave excitation, energetic cascade.

### Вступ

Динаміка фрикційної контактної взаємодії ґрунтується на різномасштабних зворотних зв'язках. В системах із розподіленими параметрами ці зв'язки мають характер нестационарного вихоро-хвильового поля збурень, що генерується переважно у рухомих контактах та суттєво трансформується під впливом граничних умов і нелінійної взаємодії – у тому числі в номінально нерухомих фрикційних контактах деталей машин, механізмів, конструкцій [1]. В роботі досліджується вплив таких контактів на частоти віброакустичного поля експериментальної машини тертя [2], що функціонує за поширеною схемою: електродвигун – привод – рухомий зразок – дослідний фрикційний контакт – номінально нерухомий контрзразок – статор. Метою роботи є встановлення фізичних механізмів і чинників вказаного впливу.

### Технічне обладнання та методика експерименту

На рис. 1–2 наведені фотографія та кінематична схема дослідної установки. В роботі використаний один із двох наявних в машині вузлів тертя, у якому контактна пара навантажувалась нормальним зусиллям за допомогою важільної системи. Це дозволяло знімати навантаження (у



Рис. 1. Фотографія дослідної установки

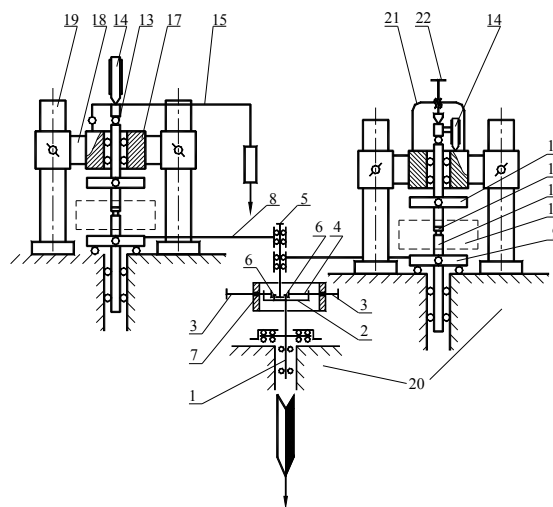


Рис. 2. Кінематична схема установки:  
1 – вал електродвигуна, 2 – направляючі, 3 – гвинтова пара, 4 – повзун, 5 – вал, 6 – гвинт, 7 – корпус, 8 – шатун, 9 – кривошип, 10, 11 – зразкотримачі, 12 – затискач, 13 – вал, 14 – датчик переміщення, 15 – важіль навантаження, 16 – роз'ємна камера, 17 – головка, 18 – направляючі, 19 – колони, 20 – основа, 21 – пружний елемент, 22 – гвинтова пара

ручному режимі) в процесі роботи установки, а також відповідно відновлювати його, реєструючи при цьому сигнал акустичної емісії працюючої установки за допомогою портативного комп'ютера з виносним мікрофоном. Паралельно з цим проводилась реєстрація амплітуди коливань рухомого зразка – з використанням індуктивного датчика переміщень. Подальша обробка записаних сигналів акустичної емісії здійснювалась із використанням стандартного програмного забезпечення, у т.ч. швидкого перетворення Фур'є.

Зворотно-поступальний рух ведучого зразка утворювався з обертового руху вала електродвигуна змінного струму за допомогою понижуючої пасової передачі та кривошипно-шатунного механізму (рис. 2). Номінальна частота коливань зразка складала ~ 28 Гц при частоті 50 Гц обертання вала електродвигуна. Амплітуда коливань зразка регулювалась через зміну величини ексцентриситету механізму.

Рухомий зразок був виготовлений із загартованої і відпущеної (44 – 47 HRC) сталі 65Г у вигляді смуги розмірами 2,7x20x120 мм. Номінально нерухомий контрзразок, виготовлений із тієї ж сталі, мав форму циліндра діаметром 40мм і висотою 50 мм з товщиною стінок 2 мм. Він був встановлений у затискачі, закріпленому в самовстановлюваній головці з направляючими, що могли рухатись відносно колон статора (рис. 1, 2). Дослідний контакт циліндр-смуга мав форму двох дужок зовнішнім діаметром 40 мм, товщиною 2 мм і шириною 20 мм кожна. Контактні поверхні попередньо оброблялись шліфуванням. Номінальний контактний тиск у навантаженому режимі складав близько 30 МПа.

**Експериментальні результати та їх обговорення**

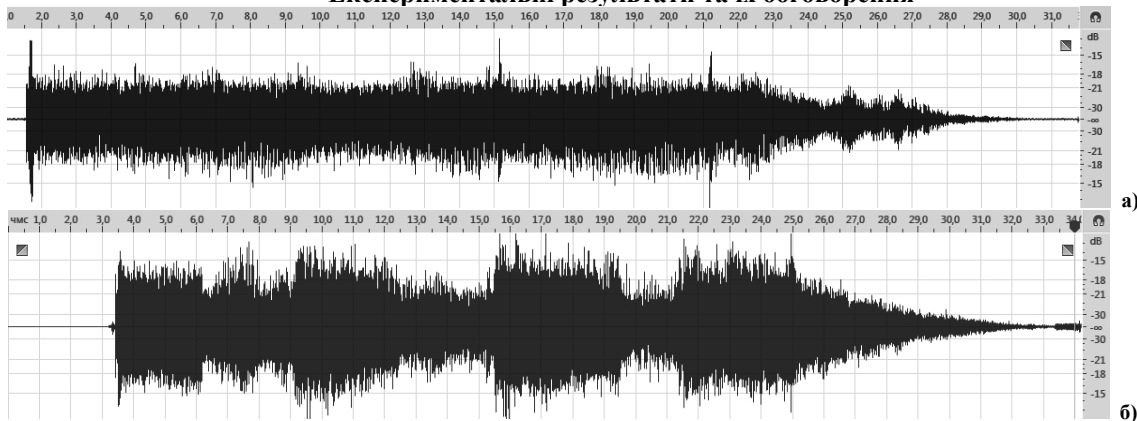


Рис. 3. Загальні осцилограми сигналів акустичної емісії дослідної машини тертя в режимах встановлення робочої амплітуди рухомого зразка : 150 мкм (а) та 300 мкм (б)

На рис. 3 наведені загальні осцилограми сигналів акустичної емісії (АЕ) в процесах випробувань, що включали триразове зняття нормального навантаження дослідного фрикційного контакту. Як видно, суттєві зміни осцилограм АЕ, пов'язані з переходом в холостий режим роботи машини тертя, спостерігались лише при підвищеному значенні амплітуди коливань рухомого зразка (рис. 3 б). При цьому сама амплітуда коливань зразка збільшувалась приблизно втричі – рис. 4.

Суттєві зміни частотного складу віброакустичного поля машини тертя, пов'язані із зміною нормального навантаження у дослідному контакті, спостерігались, між тим, як при підвищеній, так і при пониженій амплітуді коливань ведучого зразка – рис. 5. Відносно малий дисбаланс ротора при пониженій амплітуді сприяв каскадному транспорту енергії вихоро-хвильових збурень в інфразвукову частину спектру, що призводило до виникнення квазілінійних (у логарифмічному масштабі) довгохвильових ділянок спектру АЕ при переході в холостий режим – рис. 5 а, б. Центральна і короткохвильова ділянки спектрів при цьому майже не змінювались. Напроти, при підвищеному дисбалансі ротора основні зміни, пов'язані із зняттям нормального навантаження, стосувались короткохвильових ділянок спектрів АЕ – рис. 5 в, г. Вони виражались у суттєвому підсиленні коливань на частотах 2–2,5 кГц з одночасним послабленням найбільш високочастотної ділянки спектру – рис. 5 в, г. Ці зміни добре помітні і на осцилограмах сигналів АЕ відповідного часового масштабу – рис. 6.

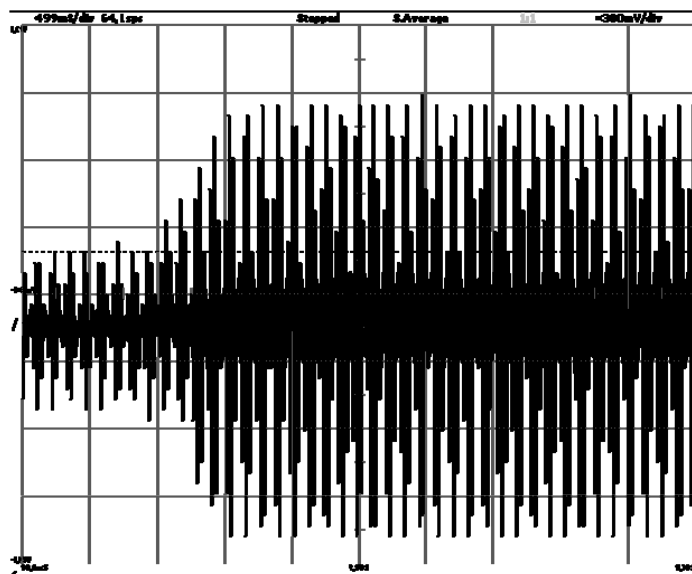


Рис. 4. Фрагмент осцилограми сигналу з індуктивного датчика переміщень рухомого зразка при початковій амплітуді переміщень 300 мкм



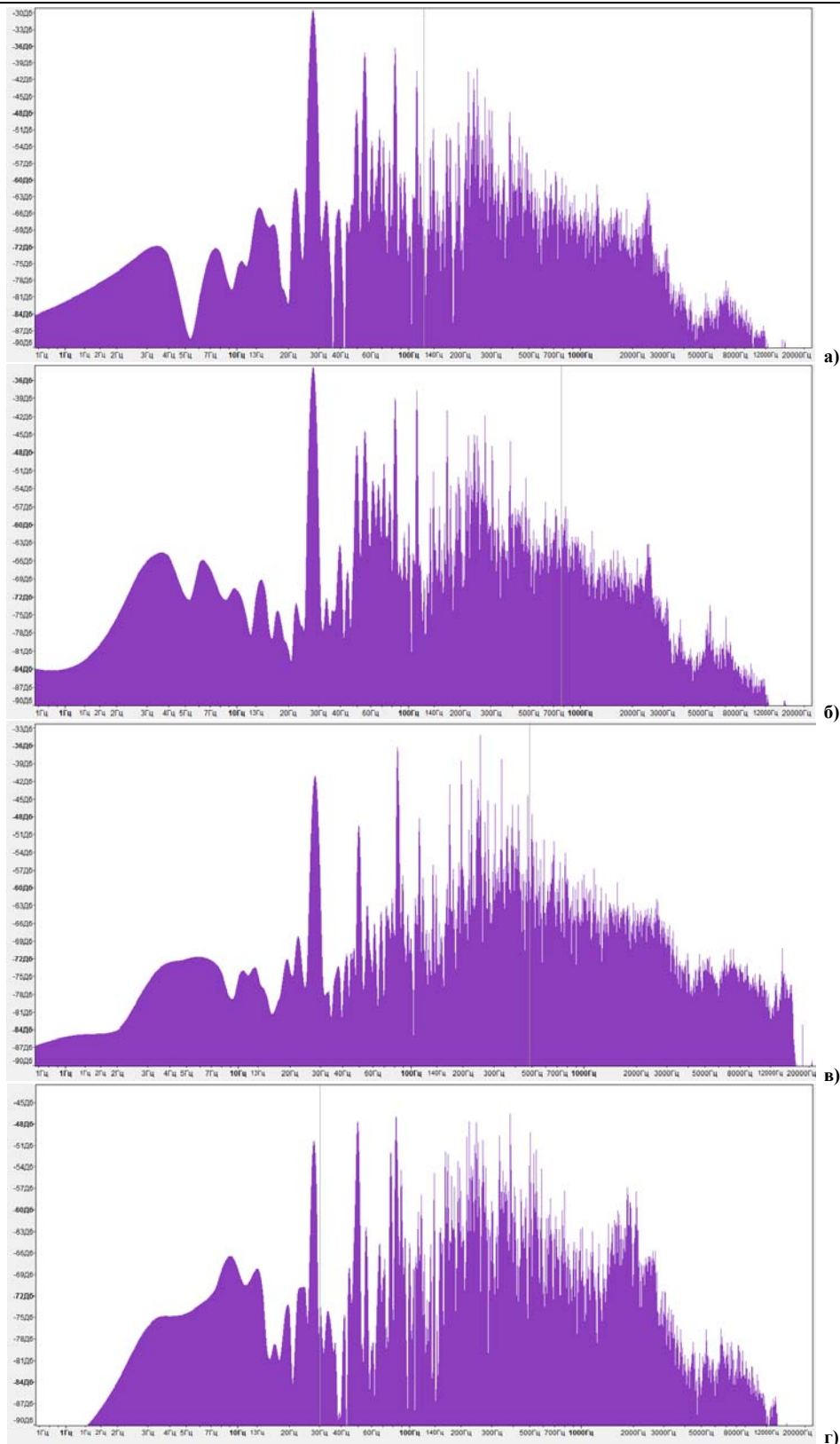


Рис. 5. Фур'є-спектри сигналів акустичної емісії в режимах навантаженого (а, в) та розвантаженого (б, г) контакту. Амплітуда коливань рухомого зразка в навантаженому режимі: 150 мкм (а, б), 300 мкм (в, г)

Отримані експериментальні результати підтверджують нерівноважний характер динамічної саморегуляції трибосистеми [1] та взаємний вплив різних факторів на енергетичні потоки збурень, що супроводжують роботу машини. У даному випадку збільшення ексцентриситету кривошипно-шатунного механізму з одночасним послабленням нормального навантаження у дослідному номінально нерухомому контакті приводить до концентрації енергії збурень в частотному діапазоні 2–2,5 кГц. Пониження ексцентриситету, як уже відмічалось, сприяє низькочастотному каскадному транспорту енергії збурень при переході в холостий режим роботи машини. Такого роду зміни не можуть бути чисельно або ж аналітично розраховані, оскільки подібні складні механічні розподілені системи не описуються спрощеними

«еквівалентними» динамічними схемами із зосередженими параметрами, а їх комп'ютерний розрахунок потребує врахування великої кількості елементів конструкції, а також реальних граничних умов у всіх контактах. Остання вимога є вкрай важливою для реалізації.

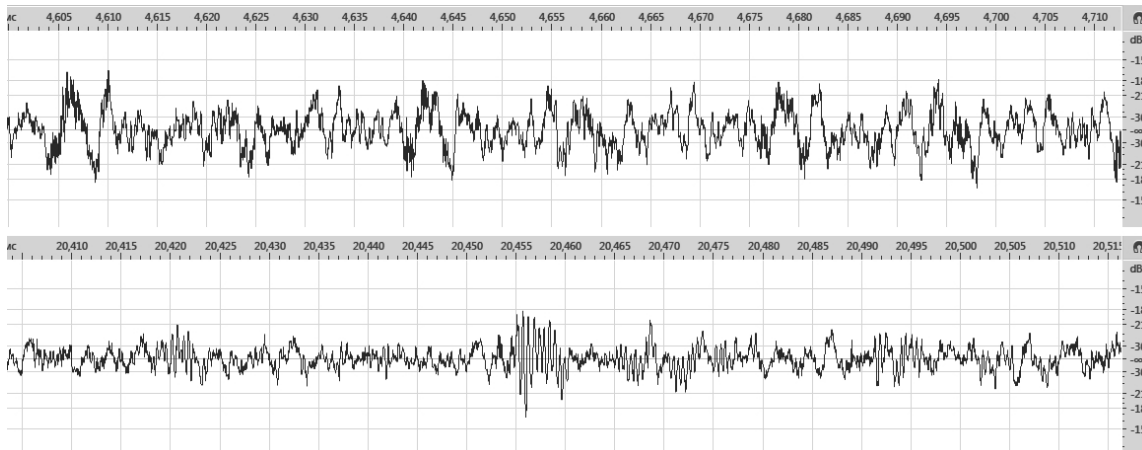


Рис. 6. Часові осцилограми сигналів акустичної емісії в режимах навантаженого (зверху) та розвантаженого (знизу) контакту при амплітуді коливань рухомого зразка 300 мкм

Таким чином, експериментальні методи дослідження параметрів та характеристик віброакустичного поля машин, механізмів і конструкцій залишаються найдієвішим засобом адекватної оцінки їх режимів експлуатації. Часовий і спектральний аналіз акустичної емісії машини тертя, застосований в даній роботі, може успішно доповнювати відомі методи вібродіагностики з використанням датчиків вібрацій, розміщених безпосередньо на елементах конструкції машини [3–5].

### Висновки

Вплив номінально нерухомих фрикційних контактів на частоти віброакустичного поля машин і механізмів слід розглядати в контексті загальної конфігурації динамічної системи, різномасштабних зворотних зв'язків та каскадного транспорту енергії вихоро-хвильових збурень.

Ослаблення затиску номінально нерухомих фрикційних з'єднань в цілому розширює спектр вібраційних частот: у височастотній області – за рахунок зменшення ефективної приєднаної маси статора, а також у низькочастотній – через інтенсифікацію зворотного енергетичного каскаду збурень, генерованих у рухомих контактах ротор – статор.

Порушення цілісності номінально нерухомих фрикційних з'єднань у складі машин і механізмів в поєднанні з незначним дисбалансом їх роторної частини стимулює каскадний транспорт енергії збурень в інфразвукову частину спектру. Це створює ризики виникнення аварійних ситуацій з вібраційним пошкодженням статорної частини машини, або ж механізму.

### Література

1. Заспа Ю.П. Когерентная трибодинамика / Ю.П. Заспа // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 6. – С. 656–673.
2. Патент України № 69559А, МПК 7601№3/00. Установка для дослідження матеріалів та покриттів в умовах фретинг-процесів / Гончар В.В., Шалапко Ю.І., Каплун В.Г. – 11.08.2003. Бюл. № 9.
3. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. – М. : Машиностроение, 1995.
4. Шалапко Ю.І. Еволюційні моделі фретинг-процесів у номінально-нерухомому фрикційному контакті : дис. ... доктора техн. наук / Ю.І. Шалапко. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – 418 с.
5. Briscoe B.I., Chateauminois A., Chiu I. and Vickery S. Acoustic Noise Emission in a Model PMMA/Steel Fretting Contact. Tribology Series, 39. Ed. D.Dowson. Amsterdam. Elsevier. 2001. P. 673–681.

### References

1. Zaspа YU.P. Coherent tribodynamics. Friction and wear. 2012, Issue 6. S.656-673.
2. Gonchar V.V., Shalapko YU.I., Kaplun V.G. Installation for study materials and coatings under fretting processes. Patent №69559A Ukraine, IPC 7601№3 / 00 dated 11.08.2003. Bul. №9.
3. Vibrations in engineering. Directory in 6 volumes. 6. T. Protection against vibration and shock. Ed. K.V.Frolov. M.: Mashinostroenie. 1995.
4. Shalapko YU. I. Evolutionary models fretting processes in the nominally-fixed frictional contact. Thesis of Doctor of Technical scientific-Khmelnytsky: HNU. 2009, 418.
5. Briscoe B.I., Chateauminois A., Chiu I. and Vickery S. Acoustic Noise Emission in a Model PMMA/Steel Fretting Contact. Tribology Series, 39/Ed. D.Dowson. Amsterdam. Elsevier. 2001, 673-681.

Рецензія/Peer review : 6.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Костогряз С.Г.

## КАСКАДНИЙ ТРАНСПОРТ ЕНЕРГІЇ ЗБУРЕНЬ В СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОЇ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Методами часового і спектрального аналізу сигналів акустичної емісії досліджені каскадні процеси передачі енергії вихоро-хвильових збурень в системах динамічної контактної взаємодії. Встановлено, що крім відомих для систем гідродинамічної турбулентності каскадних процесів з суцільним спектром збурень, для нестационарних процесів контактної взаємодії деформівних твердих тіл характерні також каскадні процеси з дискретним спектром, обумовлені внутрішнім синтезом когерентних структур руху. Відмічено нерівноважний характер каскадного транспорту енергії збурень та пов'язану з цим високу чутливість і адаптивність трибосистеми до зміни внутрішніх та зовнішніх умов її функціонування.

Ключові слова: енергетичний каскад, контактна взаємодія, динаміка, вихоро-хвильові збурення, турбулентність, когерентна структура, спектр.

YU.P. ZASPA, S.G. KOSTOGRIZ  
Khmelnytsky National University

## THE PERTURBATIVE CASCADE ENERGY TRANSPORTATION IN THE DYNAMIC CONTACT INTERACTION SYSTEMS

Cascade energy transfer processes of the vortex-wave disturbances in the dynamic contact interaction are investigated by the methods of temporal and spectral analysis of acoustic emission signals. It was identified that besides the known to the hydrodynamic turbulence systems cascade processes with continuous spectrum of perturbations, for non-stationary processes of the contact interaction of the deformable elements cascading processes with the discrete spectrum resulting from the internal synthesis coherent movement structures. The unbalanced mode of the perturbative cascade energy transportation and the associated with that high sensitivity and adaptability of tribosystem to change the internal and the external conditions of its functioning are marked.

**Keywords:** energetic cascade, contact interaction, dynamics, vortex-wave disturbance, turbulence, coherent structure, spectrum.

### Вступ

Каскадні процеси передачі енергії лежать в основі сучасних теорій гідродинамічної турбулентності [1–3]. Нестационарна контактна взаємодія деформівних твердих тіл, однак, не описується в термінах каскадного транспорту енергії вихоро-хвильових збурень. Між тим, в механічних системах, що містять обертальні (роторні) елементи, які контактують із статорною частиною, або ж між собою, нестационарне поле швидкостей частинок матеріалу неодмінно включає вихорову компоненту. Це дозволяє априорно допустити можливість енергетичних каскадів не тільки в гідродинамічних, але й в твердотільних контактних системах, застосовуючи до них добре розвинутий теоретичний апарат гідродинамічної теорії турбулентності.

Особливістю твердотільних контактних систем є одночасна присутність потенційної компоненти поля швидкостей, обумовлена пружним характером взаємодії деформівних твердих тіл. Ця особливість завідомо обмежує повноту описання нестационарної контактної взаємодії цих тіл на основі одних лише каскадних моделей турбулентності нестискуваної рідини.

Таким чином, теоретичне описання динаміки нестационарної контактної взаємодії деформівних твердих тіл із врахуванням каскадного транспорту енергії вихоро-хвильових збурень є складною і досі не вирішеною проблемою. В зв'язку з цим особливий інтерес представляють експериментальні методи дослідження згаданих вище процесів. Завданням роботи є встановлення фізичних механізмів та особливостей каскадного транспорту енергії збурень на основі експериментальних методів дослідження, в першу чергу, із застосуванням спектрального аналізу акустичної емісії, що супроводжує процеси динамічної контактної взаємодії.

### Технічне обладнання та методика експерименту

В роботі досліджені різноманітні процеси динамічної контактної взаємодії, що супроводжувались акустичною емісією: зокрема, процеси руху тіл кочення по площині основи, а також взаємодія робочих елементів машин (кутової шліфувальної, точильної) з оброблюваним матеріалом. Вивчались процеси внутрішньої взаємодії контактуючих елементів цих машин в режимах холостого ходу, а також акустична емісія експериментальної машини тертя, розробленої для дослідження номінально нерухомих фрикційних з'єднань в умовах фретингу [4]. Сигнали акустичної емісії (АЕ) реєструвались портативними комп'ютерами з вмонтованим, а також з виносним мікрофоном, в діапазоні частот 5 Гц – 20 кГц. Подальша спектральна обробка записаних сигналів АЕ здійснювалась із застосуванням стандартного програмного забезпечення (швидкого перетворення Фур'є).

### Експериментальні результати та їх обговорення

На рис. 1 в якості прикладів наведені експериментально отримані спектри сигналів АЕ від різних джерел динамічної контактної взаємодії. Спектри рис. 1а, в містять квазілінійні ділянки (в логарифмічному масштабі частот), характерні для каскадних процесів гідродинамічної турбулентності [1–3]:

$$I(\nu) \sim \nu^{-\gamma}, \quad (1)$$

де  $I$  – інтенсивність спектральної складової,  $\nu$  – частота збурення,  $\gamma$  – показник степені. Зокрема, довгохвильове крило спектру на рис. 1а при  $\gamma \approx -1,5$  можна поставити у відповідність оберненому каскаду енергії квазидвовимірної гідродинамічної турбулентності [1]. Короткохвильове крило спектру на рис. 1в при  $\gamma \approx -3$  відповідає каскаду енстрофії (квадрата завихреності) в спектрах квазидвовимірної турбулентності [1]. Енергетична накачка відмічених каскадів є достатньо широкополосною з центром  $\approx 9$  кГц (рис. 1а) та  $\approx 2$  кГц (рис.1в). Фізичним механізмом накачки у даному випадку виступають : контактна взаємодія абразивної частини круга точильної машини з металом (рис. 1а) та квазінормальні контактні коливання кульки підшипника на площині дзеркала (рис. 1в).

Водночас, спектри, показані на рис. 1, містять когерентні частотні складові, не характерні для гідродинамічної турбулентності. Ці складові переважно знаходяться в середній, а також у довгохвильовій ділянках спектрів. Механізми їх виникнення дещо різняться. Так дискретні компоненти спектру на рис. 1а обумовлені дисбалансом ротора машини. Водночас, дискретні компоненти спектрів на рис. 1б–г, не пов'язані з таким дисбалансом, слід віднести на рахунок утворення когерентних структур руху в процесі динамічної саморегуляції трибосистеми. Найбільш виразно цей процес позначається на спектрі рис. 1б – у вигляді майже еквідистантних спектральних ліній лівіше роторної частоти ( $\approx 200$  Гц).

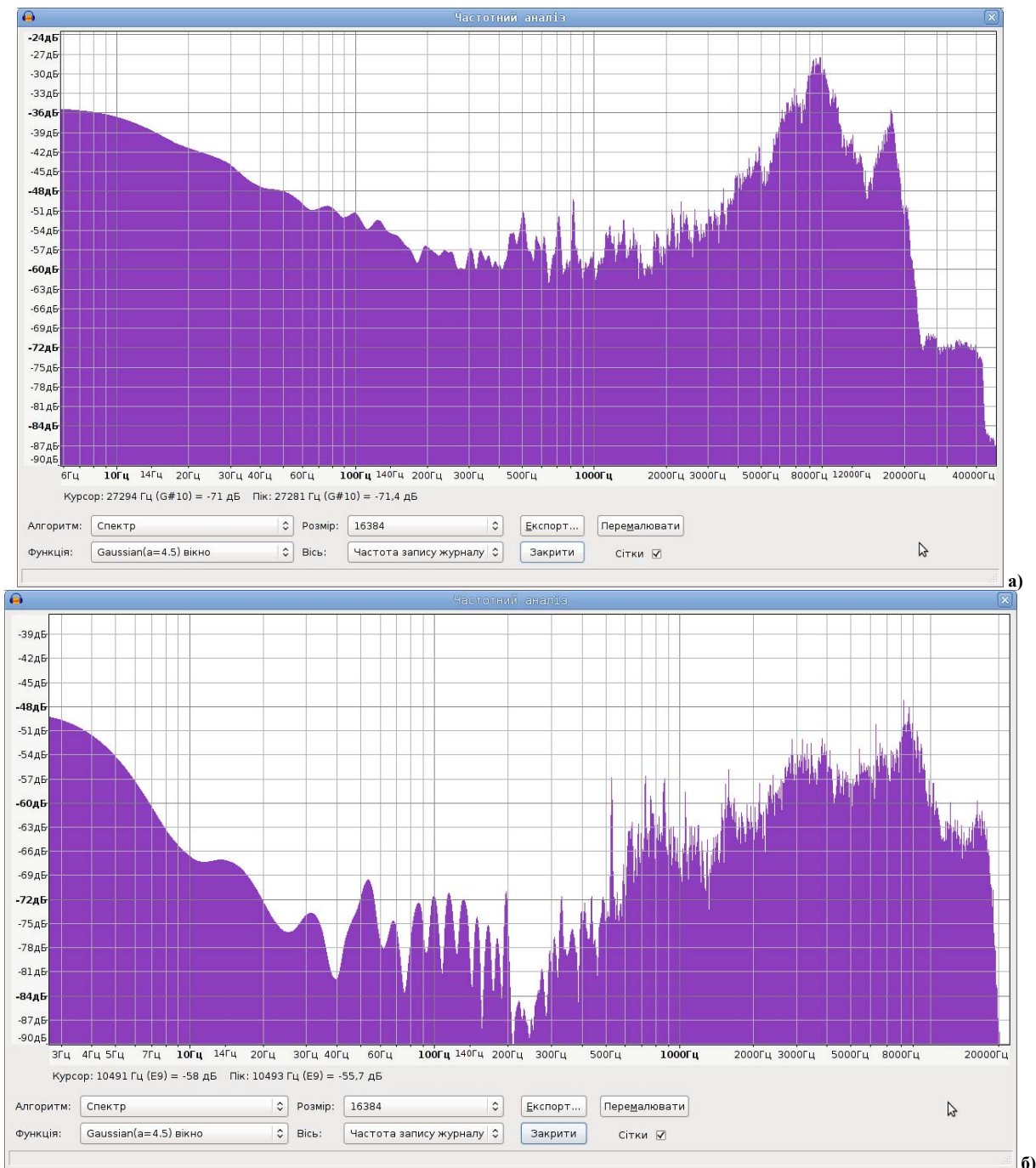


Рис. 1. Спектри сигналів акустичної емісії, отриманих в процесі заточки металевої смуги диском точильної машини (а), холостого ходу кутової шліфувальної машини (б)

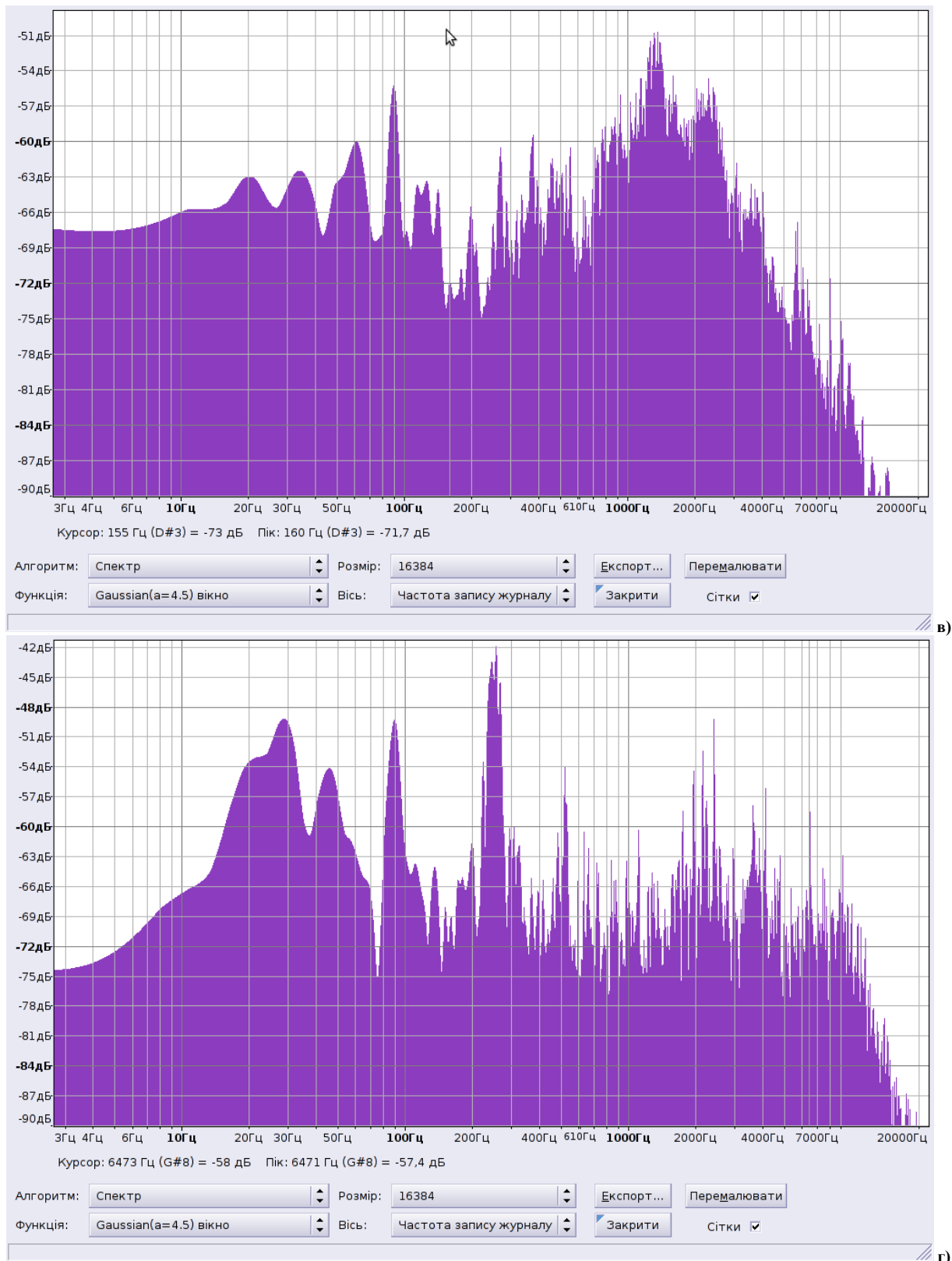


Рис. 1. (продовження). Спектри сигналів кочення кульки підшипника діаметром 13,5 мм горизонтальною площиною дзеркала (в), кочення кульки підшипника діаметром 6 мм похилою площиною дзеркала (г).

В основі внутрішнього синтезу когерентних структур руху лежать саме каскадні процеси передачі енергії по спектру збурень. Ці процеси явно виражені на різномасштабних осцилограмах сигналів акустичної емісії – рис. 2–4. Як видно з рис. 2, низькочастотна автомодуляційна складова сигналу ( $\approx 30$  Гц) утворена каскадом середньочастотних ( $\approx 150$  Гц) складових. Час існування окремого масштабу збурень, як видно (рис. 3–4), обмежений часом когерентності [5], причому спостерігається перенос енергії як від більших часових масштабів до менших (прямий каскад), так і в зворотному напрямі – рис. 3, 4. Після зміни режиму контактної взаємодії поступово встановлюється стаціонарний режим – рис. 2а, в якому



інтенсивності прямого і зворотного енергетичних каскадів умовно вирівнюються. Однак, такий стан є суттєво нерівноважним і вкрай чутливим (адаптивним) до зміни зовнішніх і внутрішніх умов в динамічній трибосистемі. Для прикладу на рис. 5 показана спектральна динаміка збурень, що відповідає осцилограмі сигналу АЕ, наведений на рис. 2а. Тут в процесі заточки металеві смуги диском кутової шліфувальної машини плавно збільшується нормальне контактне зусилля (в ручному режимі). Як видно, на перших етапах заточки (рис. 5а, б) домінують довгохвильові автомодуляційні збурення, а роторна частота ( $\approx 200$  Гц) в спектрі проявлена відносно слабо. На завершальному етапі (рис. 5г) в зв'язку із збільшенням контактного стиску, навпаки, домінує каскад відносно вузьких середньочастотних ліній, що бере початок від роторної частоти ( $\approx 150$  Гц).

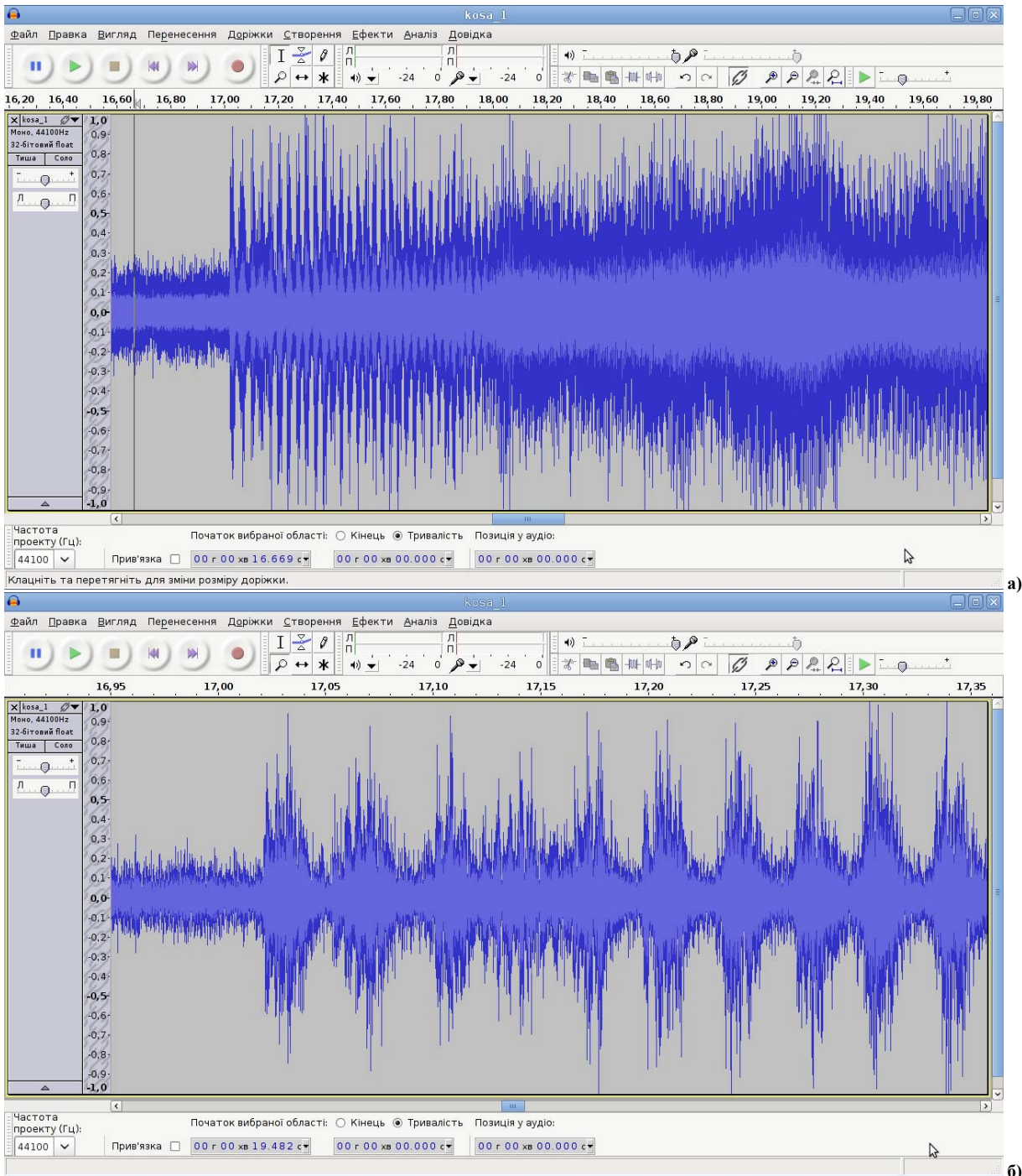


Рис. 2. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ, що супроводжує процес заточки металеві смуги диском кутової шліфувальної машини

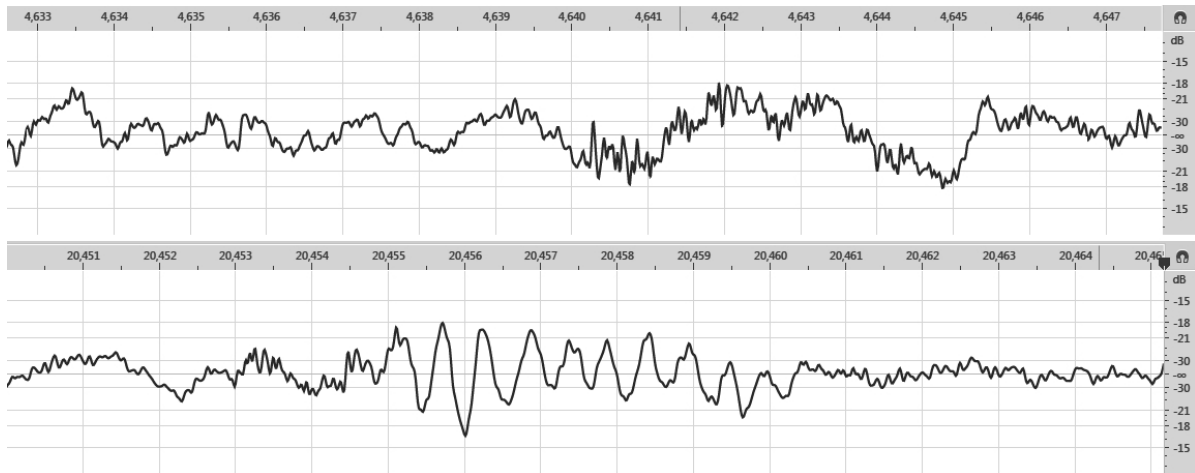


Рис. 3. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ, зареєстрованого в процесі роботи дослідної машини тертя

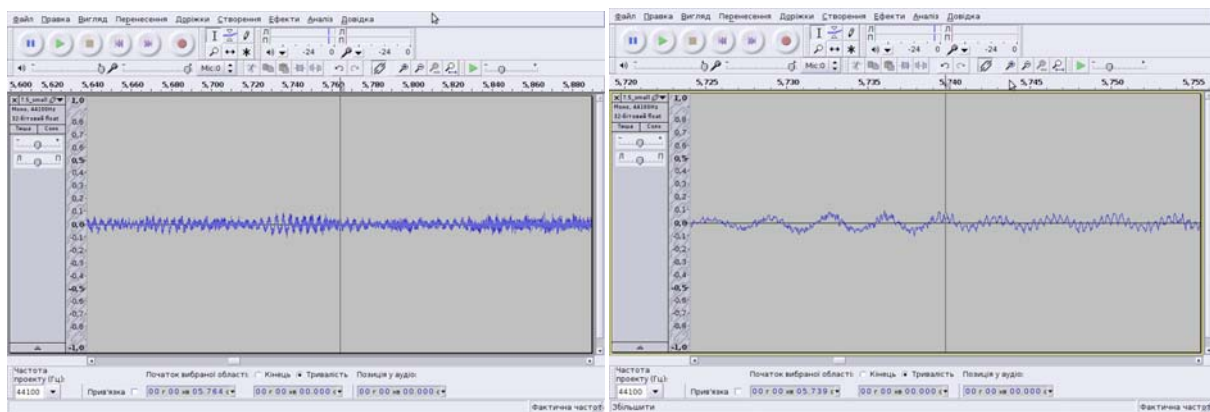


Рис. 4. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ при коченні кульки підшипника діаметром 6 мм похилою площиною дзеркала

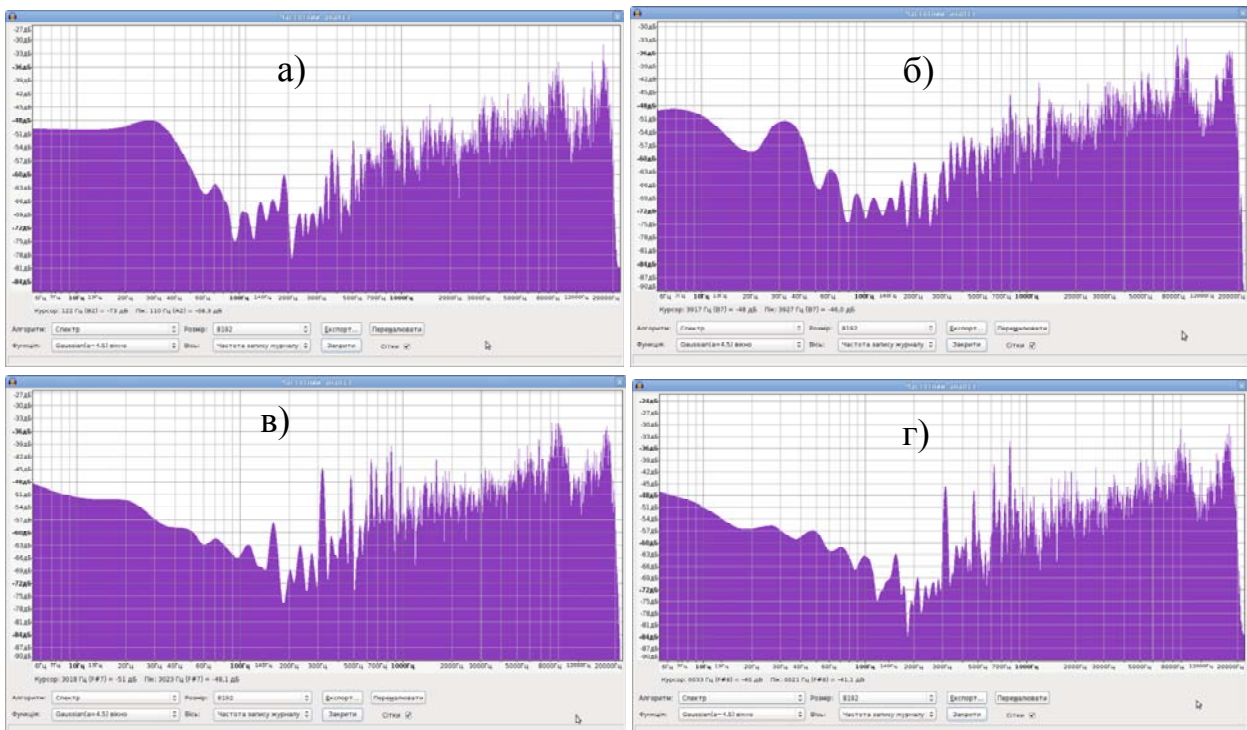


Рис. 5. Спектри сигналу АЕ, показаного на рис. 2а, в часових інтервалах (секунди): 17,0–17,3 (а), 17,6–17,9 (б), 18,2–18,5 (в), 18,5–18,8 (г)

**Висновки**

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтверджують наявність каскадних процесів передачі енергії вихоро-хвильових збурень в системах динамічної контактної взаємодії деформівних твердих тіл.

В роторних контактних системах ,де нестационарне поле швидкостей елементів матеріалу близьке

до двовимірного, спостерігаються прямі і обернені каскади, характерні для квазидвовимірної гідродинамічної турбулентності. Водночас, суттєвою відмінністю каскадних процесів передачі енергії в контактних системах деформівних твердих тіл є участь когерентних структур руху в транспорті енергії збурень.

Нестационарне вихоро-хвильове поле збурень, утворене в результаті динамічної саморегуляції трибосистеми, є нерівноважним і високо адаптивним до зміни внутрішніх і зовнішніх умов її функціонування.

### Література

1. Данилов С.Д. Квазидвумерная турбулентность / С.Д. Данилов, Д. Гурарий // Успехи физических наук. –2000. – Т.170, № 9. – С. 922–968.
2. Степанов Р.А. О спектральных свойствах спиральной турбулентности / Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, А.В. Шестаков // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2009. – № 5. – С. 34–44.
3. Левшин А.О. Затухание спиральности в однородной турбулентности / А.О. Левшин, О.Г. Чхетиани // Письма в ЖЭТФ. – Т.98, вып. 10. – С. 670–675.
4. Пат. 69559А України. МПК G7601N3/00. Установка для дослідження матеріалів та покриттів в умовах фретинг-процесів / Гончар В.В., Шалапко Ю.І., Каплун В.Г. – Опубл. 11.08.2003, Бюл. № 9.
5. Заспа Ю.П. Когерентная трибодинамика / Ю.П. Заспа // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 6. – С. 656–673.

### References

1. Danylov S.D., Gurarii D. Kvazydvumernaya Turbulentnost. Uspekhy fizycheskyh nauk. 2000, Vol.170, №9. P.922-968.
2. Stepanov R.A., Frik P.H., Shestakov A.V. O spectralnikh svoystvakh spyrальной turbulentnosti. Izv. RAN. Mechanics of fluid and gas. 2009, №5, P.34-44.
3. Levshin A.A., Chhetyany A.G. Zatushanye spyrальnosti v odnorodnoy turbulentnosti. Pis'ma v ZHETF, Vol. 98, Issue 10, P.670-675.
4. Pat. 69559A Ukraine. IPC G7601N3 / 00. Installation for study materials and coatings under fretting processes / Gonchar V.V., Shalapko YU.I., Kaplun V.G. Publish. 11.08.2003, Bull. №9.
5. Zaspа YU.P. Koherentnaya trybodynamyka. Trenye i iznos. 2012, vol. 33, №6, P.656-673.

Рецензія/Peer review : 8.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.



Д.В. ЛАЗАРЕВА, А.І. ПОТАПЕНКО

Одеський національний політехнічний університет

Г.Б. ПАРАСКА

Хмельницький національний університет

## БІОМЕХАНІКА ЕЛЕМЕНТІВ ЗУБОЩЕЛЕПНОЇ СИСТЕМИ ЗІ ШТУЧНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

*У роботі з використанням кінцево-елементного пакета ANSYS виконано моделювання і розрахунок напружено-деформованого стану бічного фрагмента нижньої щелепи зі штучними включеннями у вигляді циліндричних імплантатів. Визначено характер розподілу напруг у кортикальному шарі кістки, губчастій кістці і імплантатах.*

*Ключові слова:* біомеханіка, зубощелепна система, імплантат, метод кінцевих елементів, ANSYS.

D.V. LAZAREVA, A.I. POTAPENKO

Odessa National Polytechnic University

H. B. PARASKA

Khmelnitsky National University

## BIOMECHANICS OF DENTITION ELEMENTS WITH ARTIFICIAL INCLUSIONS

*Abstract - Using a finite element package ANSYS modelling and calculation of the stress-strain state of the lateral fragment of the lower jaw with artificial inclusions in the form of cylindrical implants was made in this paper. The character of the stress distribution in the cortical bone, cancellous bone and implants was determined. The nature of the distribution of equivalent stresses suggests that they are maximum at the location of load application and do not exceed the tensile strength.*

*Key words:* biomechanics, dentition, implant, finite element method, ANSYS.

### Вступ

Дослідження напружено-деформованого стану елементів зубощелепної системи вимагає застосування чисельних методів механіки деформованого твердого тіла, тому що у зв'язку зі складністю форми й структури її компонентів одержання аналітичних (точних) рішень неможливо. Практично у всіх відомих в цій області дослідженнях для рішення завдання застосований метод скінчених елементів (МСЕ).

МСЕ активно застосовується для рішення різних завдань механіки деформованого твердого тіла. Він досить широко представлений у літературі. Можна відзначити монографії О. Зінкевича, Д. Норрі, А.С. Сахарова, Р. Галагера [1]. Теорія МСЕ докладно описана в багатьох статтях і книгах.

### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є зубощелепна система зі штучними включеннями у вигляді циліндричних імплантатів. Для вивчення напружено-деформованого стану та характеру розподілення напружень в усіх компонентах цієї системи застосований обчислювальний скінчено-елементний комплекс ANSYS [2], можливості якого дозволяють розглядати складні об'єкти з різними фізико-механічними властивостями.

### Постановка завдання

Метою роботи було визначення напружень та деформацій у компонентах зубощелепної системи – кортикальному шарі кістки, губчастій кістці, імплантатах.

### Результати та їх обговорення

#### Моделювання зубощелепної системи

Засоби препроцесорного твердотілого моделювання програми ANSYS дозволяють мати справу безпосередньо з геометричною моделлю, не звертаючись до специфічних об'єктів (вузлів та елементів) скінчено-елементної моделі. Для того щоб полегшити генерацію моделі, програма відокремлює фазу завдання геометрії й граничних умов від побудови сітки скінчених елементів. Спочатку користувач описує геометрію твердотілової моделі, потім програма будує сітку, що автоматично визначає місце розташування вузлів і сполучність елементів.

При побудові зубощелепної системи у програмі ANSYS використовувався «висхідний» метод твердотілого моделювання. При висхідному моделюванні користувач будує модель, починаючи з об'єктів найнижчого порядку. Спочатку задаються ключові точки, потім пов'язані з ними лінії, поверхні й об'єми — саме в такому порядку.

У побудованій тривимірній моделі практично всі лінії “каркаса” являють собою неоднорідні раціональні B-Сплайни.

Представлення об'єктів моделі на основі сплайнів уможливило застосування методу побудови поверхні, відомого як “обтягування каркасу”. За допомогою цього методу був заданий деякий набір поперечних перерізів, на основі яких створена відповідна до зазначених перерізів поверхня.

Одним з найбільш важливих етапів скінчено-елементного аналізу є побудова сітки скінчених елементів. Точність розрахунків за допомогою МСЕ залежить від правильного вибору типів і розмірів скінчених елементів. В існуючих програмних комплексах, як правило, передбачаються два основні методи: побудова довільної сітки й упорядкованої. Геометрія розглянутої моделі така, що неможливо побудувати

тільки впорядковану сітку. Тому при розбивці елементів складної геометрії використана довільна сітка.

Побудована модель апроксимована об'ємним шестигранним скінченним елементом SOLID95 який має три ступені волі в кожному вузлі — переміщення в напрямках осей X, Y, Z вузлової системи координат. Елемент може приймати вироджену форму, що особливо зручно при розгляді конструкції складної конфігурації.

Перед створенням скінчено-елементної сітки необхідно виділити передбачувані області концентрації напружень, у яких сітку згущають. У той же час велика сітка може застосовуватися в зонах з мало змінними відносними деформаціями або напруженнями, а також в областях, що не представляють особливого інтересу для дослідника. Розміри сусідніх елементів поблизу концентратора напружень не повинні суттєво різнитися, тому що це впливає на точність отриманих результатів. Також на точність обчислень впливає форма скінченних елементів. Слід уникати занадто витягнутих елементів; елементи із приблизно однаковими розмірами сторін дають меншу помилку.

Отримана скінченно-елементна модель зубощелепної системи (рис. 1) є максимально наближеною до реальної й свого роду універсальною. У даній моделі передбачена можливість заміни зубів на штучні включення. Однак через складну геометрію вона має близько 40% вироджених елементів, що може вплинути на точність розрахунків і призвести до неадекватних результатів. У зв'язку із цим, у розумних межах, були допущені деякі спрощення: оскільки дослідженню підлягає саме фрагмент кістки зі штучними включеннями, моделюванням зубів можна знехтувати; модель симетрична відносно повздовжньої площини; жорсткість фрагмента кістки постійна.

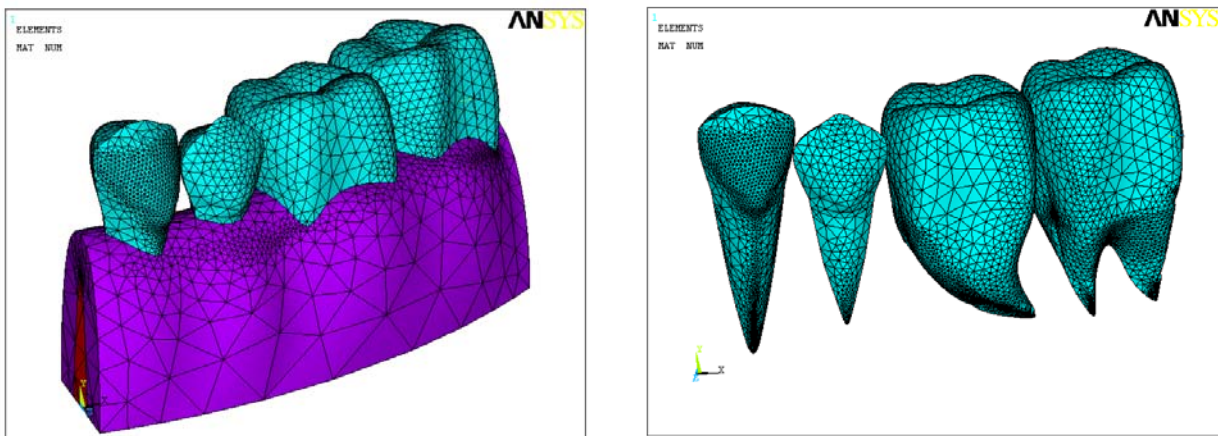


Рис. 1. Скінченно-елементна модель зубощелепної системи

Побудовані тривимірні скінчено-елементні моделі містять у собі об'єми кортикальної, губчатої кістки і імплантату. Усереднені розміри елементів і механічних параметрів узяті з довідкової літератури.

Відповідно до літературних даних механічні властивості компонентів моделі (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, межа міцності) прийняті рівними величинам (табл. 1).

Таблиця 1

**Фізико-механічні характеристики структурної складової скінченно-елементної моделі**

Матеріал	Модуль пружності E, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа
Кортикальний шар кістки	$2,0 \cdot 10^4$	0,3	45,0
Губчата кістка	$5,0 \cdot 10^3$	0,3	15,0
Імплантат	$1,1 \cdot 10^5$	0,35	800,0
Балка	$2,0 \cdot 10^5$	0,3	850,0

Для апроксимації обраний елемент SOLID92 (рис. 2), що являє собою об'ємний 10-ти вузловий чотиригранник. Цей елемент використовується при нерегулярній розбивці сітки, не підтримує елементи виродженої форми так як має пірамідальну форму. У результаті розбивки отримані скінчено-елементні моделі мають близько 152700 скінченних елементів і 224500 вузлів. На рис. 3 наведена твердотільна та скінченно-елементна модель зубощелепної системи з штучними включеннями.

В роботі виконано аналіз однопролітної конструкції на двох опорних циліндричних імплантатах (рис. 4,а) з однаковими кутами нахилу  $\beta = 10^\circ$ . Зосереджена сила  $F = 400$  Н прикладена під кутом  $\theta = 10^\circ$ . Довжина імплантату (рис. 4,б) постійна і становить 10 мм.

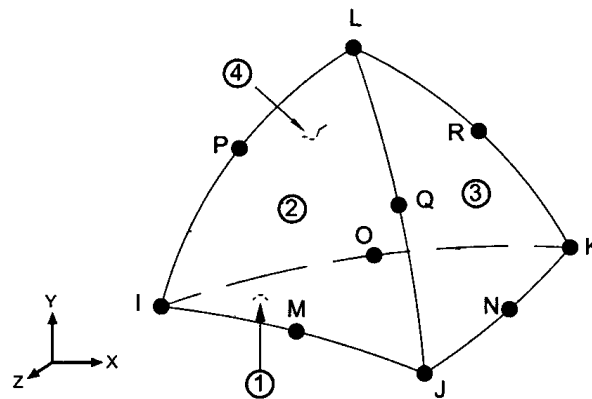


Рис. 2. Скінченний елемент SOLID92

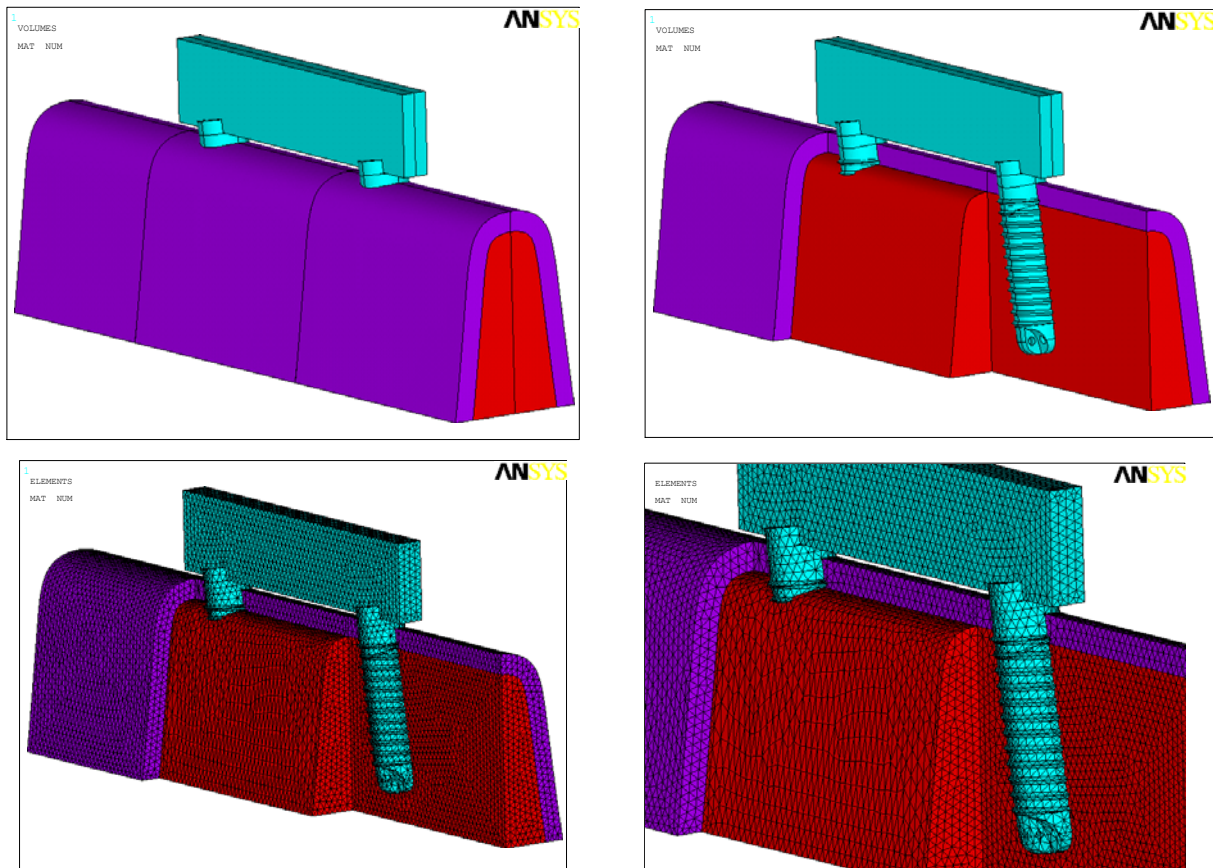


Рис. 3. Твердотільна та скінченно-елементна модель

### Розрахунки та їхній аналіз

Програма ANSYS дозволяє в результаті розрахунків одержати цілий комплекс параметрів напружено-деформованого стану (НДС) конструкції: напруження й деформації в напрямках координатних осей, головні напруження й відповідні деформації, еквівалентні напруження за гіпотезою Губера-Мізеса, переміщення всіх точок конструкції і цілу низку інших величин. Процедура візуалізації дозволяє переглядати поля напружень і деформацій, встановлювати найбільш напружені ділянки об'єкта дослідження.

У результаті скінченно-елементного аналізу об'ємної моделі сегмента щелепи зі штучними вклученнями були отримані діаграми сумарних переміщень (рис. 5), еквівалентних напружень (рис. 6), розподілу рівнів еквівалентного напруження в імплантатах (рис. 7), кортикальному й губчатому шарах кісткової тканини (рис. 8).

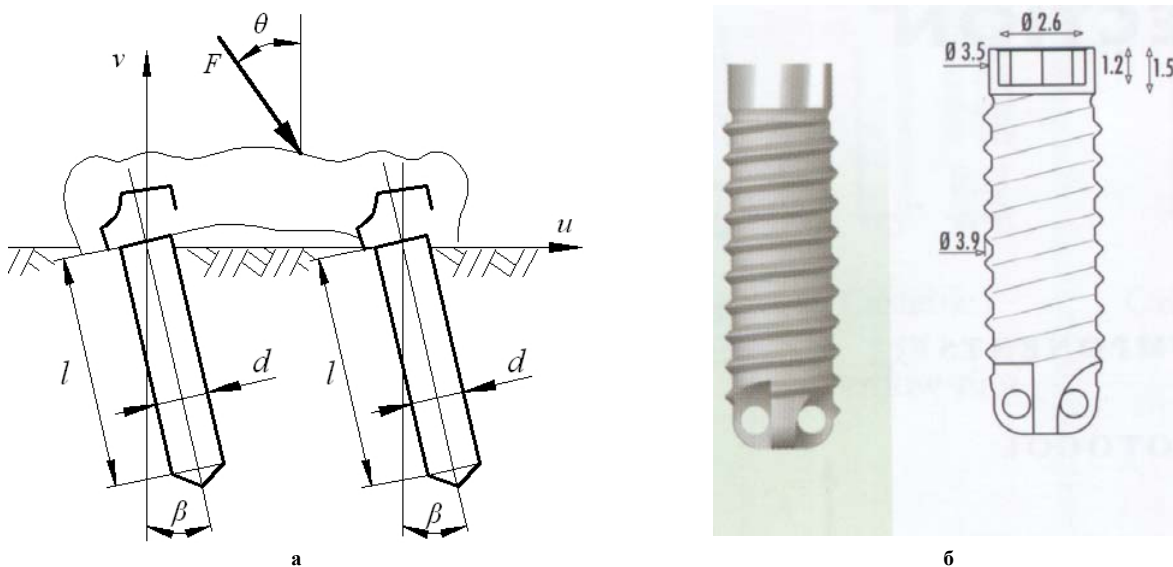


Рис. 4: а – схема навантаження; б – циліндричний імплантат

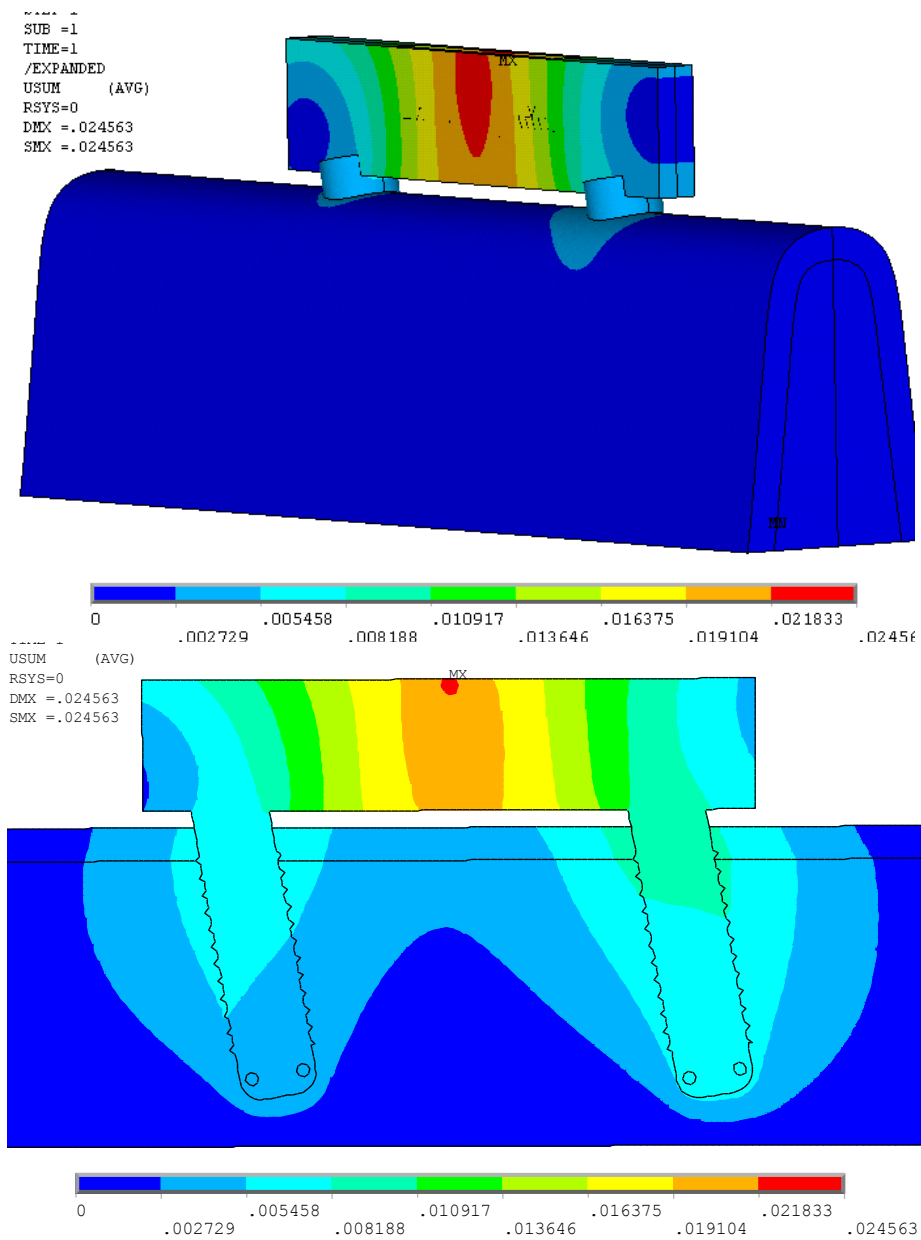


Рис. 5. Епюра сумарних переміщень

```
SUB =1  
TIME=1  
/EXPANDED  
SEQV (AVG)  
DMX =.016405  
SMN =-649.891
```

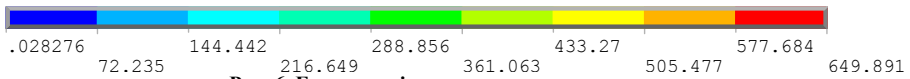
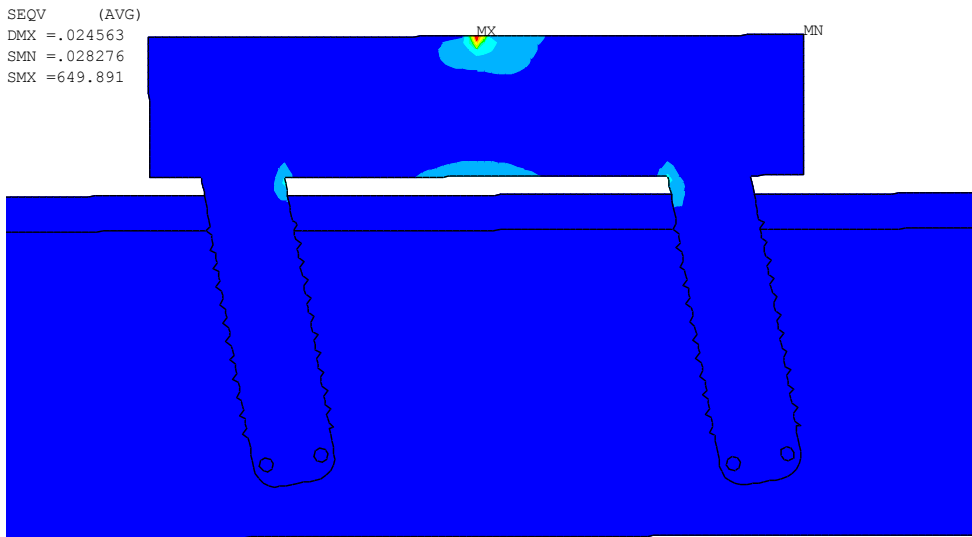
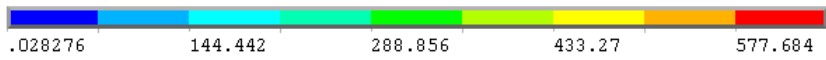
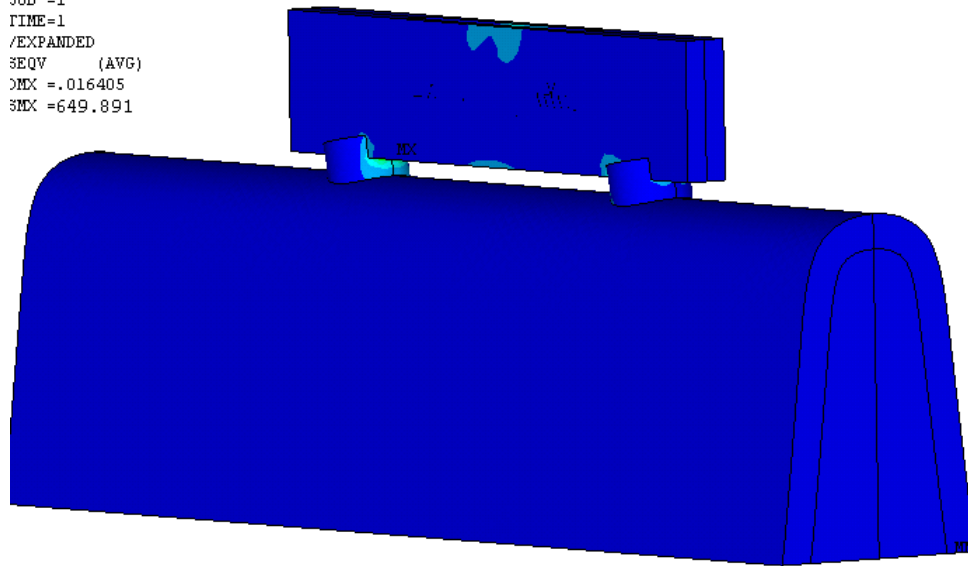


Рис. 6. Епюра еквівалентних напружень

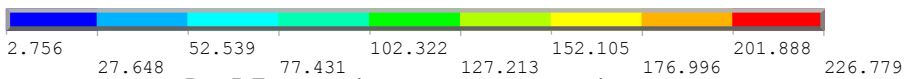


Рис. 7. Епюра еквівалентних напружень в імплантатах

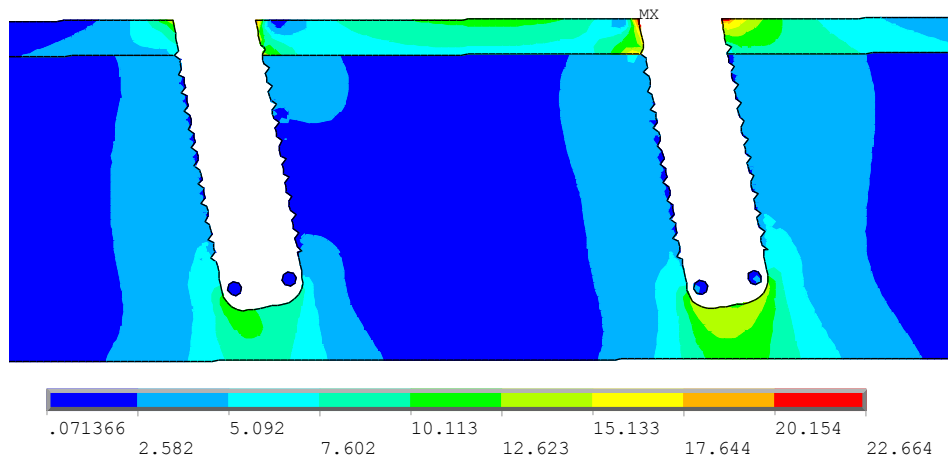


Рис. 8. Епюра напружень в кортикальному та губчастому шарах кісткової тканини

### Висновки

Характер розподілу еквівалентних напружень свідчить про те, що максимальними вони є в місці прикладення навантаження (649,9 МПа) й не перевищують межу міцності. Так само напруженою є зона біля шийки імплантату (226,8 МПа); підвищені напруження в області зіткнення імплантату й кортикальної кістки (22,7 МПа), де виникає концентрація напружень на поверхні сполучення, викликані стрибкоподібною зміною твердості матеріалів, що сполучаються. Однак у частині імплантату, який знаходиться у шарі губчастої кістки, напруження малі і становлять 98,7 МПа. Максимальні переміщення є несуттєвими й складають лише 0,024 мм.

### Література

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Галлагер Р. ; пер. с англ. — М. : Мир, 1984. — 428 с.
2. Дашенко А.Ф. ANSYS в задачах инженерной механики / Дашенко А.Ф., Лазарева Д.В., Сурьянинов Н.Г. ; под редакцией Н.Г. Сурьянинова.— Одесса: Астропринт, 2007. — 484 с.
3. Матвеева А.И. Исследование биомеханики дентальных имплантатов с использованием методики трехмерного объемного моделирования / А.И. Матвеева, Р.Ш. Гветадзе, В.Э. Логинов, С.С. Гаврюшин, А.В. Карасев // Стоматология. — М., 1998. — № 6. — С. 38–44.
4. Сухарев М.Ф. Изучение биомеханического взаимодействия имплантатов и кости методом математического моделирования / М.Ф. Сухарев, А.В. Бобров // Клиническая имплантология и стоматология. — 1997. — № 2. — С. 34–37.
5. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния зубных протезов / Чумаченко Е.Н., Арутюнов С.Д., Лебеденко И.Ю. — М. : Молодая гвардия, 2003. — 270 с.

### References

1. Gallager R. The finite element method. Basics. M.: Mir, 1984. 428 p.
2. Dashhenko A.F., Lazareva D.V., Sur'yaninov N.G. ANSYS in problems of engineering mechanics. Odessa: Astroprint, 2007. 484 p.
3. Matveeva A.I., Gvetadze R.S., Loginov V. E., Gavryushin S.S., Karasev A.V. Research of the biomechanics of dental implants using the technique of three-dimensional modeling. Dentistry. M., 1998. No. 6. P. 38–44.
4. Suxarev M.F., Bobrov A.V. The study of the biomechanical interaction between implants and bone by the method of mathematical modeling. Clinical implant implantology and stomatology. 1997. No. 2. P. 34–37.
5. Chumachenko E. N., Arutyunov S. D., Lebedenko I. Y. Mathematical modeling of the stress-strain state of dentures. M.: Molodaya Gvardiya, 2003. 270 p.

Рецензія/Peer review : 16.1.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.С.

## ГОФРООБРАЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОДОЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА

*Разработан метод оценки гофрообразования при формовке косинусообразных фитингов, изогнутых осадкой трубчатой заготовки. В основе метода лежит энергетический критерий устойчивости и экспериментально-расчетные зависимости деформированного состояния. Первоначальными данными для расчета являются геометрические параметры изделия и свойства материала в виде показателя деформационного упрочнения.*

*Ключевые слова: гофрообразование, потеря устойчивости, показатель деформационного упрочнения, косинусообразный фитинг.*

O.V. HRUSHKO

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

### CORRUGATION OF PIPE SHELL BLANK IN THE PROCESS OF NONELASTIC BUCKLING

*Abstract – the purpose of the research is prognostication of corrugation for the process of forming of cosine shaped fittings with the use of axial compression of pipe shell blank. A pipe shell blank acquires a cosine shape in the process of forming. The axis of the fitting can be described by the exponential function of Gausse. On the basis of experiment the coefficients of approximation of this function are found. The minimum radius of curvature when corrugation appear at is found from mathematical correlations. The method of estimation of corrugation pipe shell blank is developed. The method is based on the energy stability criterion and experimental and calculated dependences of strain state. Initial data for calculation are geometric parameters of the product and material properties as an rate of strain hardening. Dependence of critical radiuses on the rate of strain hardening is substantial. Blanks from metals with a greater capacity for strain hardening can be bending on less radiuses.*

**Keywords:** corrugation, buckling, the rate of strain hardening, cosine shaped fitting.

#### Введение

В работах [1, 2] указывается на возможность получения полуфабрикатов стержневых изделий, изогнутых по схеме сжатия с дальнейшей потерей устойчивости, практически не требующей применения сложной штамповой оснастки (рис. 1). Там же указаны перспективы использования продольного изгиба для получения особого вида трубчатых фитингов – обводных патрубков. Последние рационально использовать при монтаже трубопроводов сложных конструкций, пересекающих ось перпендикулярно расположенных труб или стержней. Также такого рода полуфабрикаты могут быть применены в качестве заготовок под точные изделия – крутоизогнутые отводы или гнутые патрубки [2, 3]. Прогнозирование стабильности протекания процесса может быть выполнено на основе моделей механики процесса, позволяющих рассчитывать рациональные и предельные режимы формоизменения. Отметим также, что на стабильность процесса при прочих равных условиях оказывают механические свойства металла, отображаемые в его карте [3]. Рассматриваемому процессу присущ достаточно широкий перечень технологических отказов, проявляющихся в виде разрушения, искажения формы [4], смятия торцевых участков, среди которых выделим наиболее распространенный вид брака – потерю устойчивости сжатой части патрубка в виде гофр. Такое явление получило название гофрообразование (в литературе также используется термин «волнообразование») и, как правило, оно является недопустимым для изогнутых трубчатых изделий [5, 6].

#### Анализ исследований. Постановка задачи

В ряде работ по исследованию устойчивости пластического формоизменения отображены принципы, позволяющие прогнозировать такой вид технологического отказа. В частности, решение Ю. Н. Алексева для свободного изгиба трубы [6], основано на энергетическом критерии и аналитических зависимостях напряженно-деформированного состояния в процессе формообразования. При этом рассматривалось волнообразование при свободном изгибе труб в статических условиях. Известны исследования, указывающие на достаточную точность инженерных формул, базирующихся на указанном подходе [3, 4].

Согласно [6] уравнение потери устойчивости имеет вид:

$$\iint \left[ W + 0.5s \left( \sigma_1 \omega_1^2 + \sigma_2 \omega_2^2 + 2\tau_{12} \omega_1 \omega_2 \right) \right] df = 0, \quad (1)$$

где  $s$  – толщина стенки;  $\omega_1, \omega_2$  – деформации в направлениях 1 и 2 (осевом и окружном);  $\tau_{\alpha\theta} = 0$ ;  $\sigma_1 = \sigma_\alpha$ ,  $\sigma_2 = \sigma_\theta$  – касательное и нормальные напряжения соответственно;  $W$  – потенциал моментов.

В результате для свободного изгиба трубы моментом получено значение критического радиуса изгиба



$$\rho_{kp} = \frac{8r \left( 2 + \frac{l^2}{\pi^2 k^2 r^2} \right)}{\pi s^2 \left( \frac{\pi^2 k^2 n}{l^2} + \frac{1}{r^2} \right)}, \quad (2)$$

где  $k$  – число полуволин вдоль оси трубы;  $r$  – срединный радиус трубы;  $s$  – толщина стенки;  $l$  – длина изогнутой части;  $n$  – показатель деформационного упрочнения при степенной аппроксимации кривой упрочнения ( $\sigma_i = Ae_i^n$ ).  $n$  для данного решения является параметром карты металла.

Гипотетически, зависимость (2) может применяться для широкого класса процессов гибки труб, если опасная, с точки зрения гофрообразования, область оболочки а) безмомента; б) свободна от контактных напряжений.

Отметим, что нам не известны другие методики определения критического радиуса изгиба, при котором образуются гофры, поэтому она в некотором роде уникальна по общности теоретического решения при различных способах изгиба труб.

Целью исследования является прогнозирование гофрообразования в зависимости от геометрических соотношений изделия и параметров карты металла для процесса формообразования косинусообразных фитингов с использованием осевого сжатия трубной заготовки.

### Исследование

Вследствие схожести напряженных состояний при отсутствии инструмента в зоне возможного гофрообразования, вывод искомой зависимости для изгиба трубы с осадкой полностью соответствует рассуждениям работы [6].

Таким образом, формула (2) по отношению к обозначениям нашей задачи приобретает вид

$$R_{kp} = \frac{8r \left( 2 + \frac{(H_k/4)^2}{\pi^2 k^2 r^2} \right)}{\pi s^2 \left( \frac{\pi^2 k^2 n}{(H_k/4)^2} + \frac{1}{r^2} \right)}, \quad (3)$$

где коэффициент 1/4 при  $H_k$  учитывает действительную длину заготовки по оси  $x$  для той части патрубка, где происходят бифуркации оболочки (рис. 2).

Для расчетов следует брать  $k = 1$  (при одной полуволине гофра), однако на практике после возникновения одной полуволны может реализоваться и большее их количество – 3, 5, 7.

Наиболее опасная область, с точки зрения утонения стенки, находится на внутренней части изгиба ( $\theta = 3\pi/2$ ) по плоскости симметрии ( $x_c = 0,5H_k$ ).

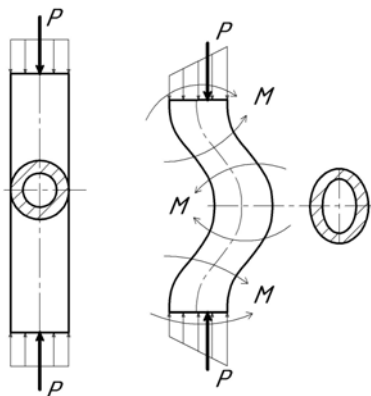
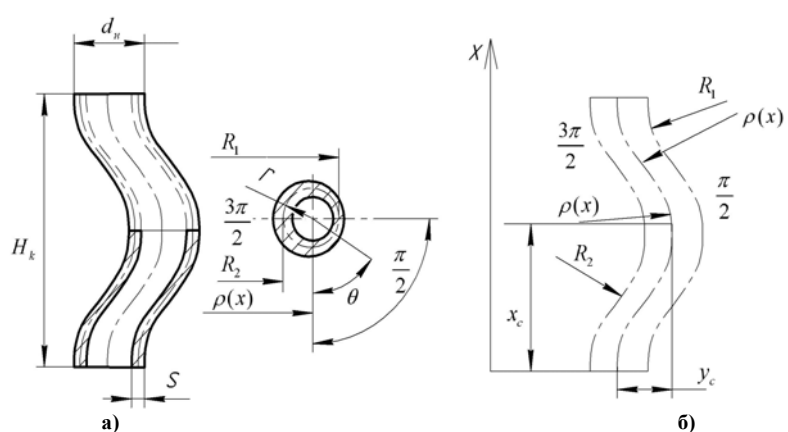


Рис. 1. Осадка с изгибом трубчатой заготовки



$x_c = 0,5H_k$  – координата наибольшего прогиба (центральная часть);

$\theta$  – координата радиус-вектора в окружном направлении оболочки

Рис. 2. Геометрические параметры косинусоидально изогнутой трубы (а) и схема напряженного состояния

В результате формообразования трубчатая заготовка приобретает косинусоидальный вид, ось которой можно описать различными функциями: косинусоидой, дугами окружности разной кривизны, дугами эллипса, экспоненциальными и степенными функциями. Путем нелинейного регрессионного анализа показано, что наилучшее приближение ( $R_{adj}^2 = 0,97...0,99$ ) для разных типоразмеров и материалов патрубка



имеет функция, отвечающая экспоненте Гаусса в виде [7]

$$y(x) = y_c \exp \left[ - \left( \frac{x - x_c}{H_k w} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $H_k$  – расстояние между торцами изогнутого патрубка (см. рис. 2);  $y_c$  – наибольший прогиб оси;  $x_c = 0,5H_k$  – координата наибольшего прогиба (соответствует координате плоскости симметрии);  $w$  – коэффициент аппроксимации.

Расчеты на основе эксперимента показали, что  $w$  слабо зависит от геометрии заготовки и степени изгиба патрубка на основной стадии деформирования. Так, осаживали ряд заготовок из меди марки М1, стали Ст. 3, латуни Л98, свинца марки ССу, Сталь 20, алюминиевого сплава АД33Т1. Геометрические размеры варьировались в пределах  $l_0 / d_0 = 4 \dots 6$ ,  $d_0 / s_0 = 4 \dots 7$ . Путем нелинейного регрессионного анализа с использованием пакета программ OriginPro нашли, что значение  $w = 0,319 \pm 0,008$ .

В процессе формообразования заготовка непрерывно уменьшает длину своей оси, за счет пластической осадки. Планированием эксперимента найдена величина относительного уменьшения длины оси

$$\delta = k_\delta \left( 1,716 - 0,263 \cdot \frac{l_0}{d_0} \right) \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где  $k_\delta$  – коэффициент, зависящий от толстостенности трубы  $d_0 / s_0$ ;  $\varepsilon = \frac{l_0 - H_k}{H_k}$  – относительное уменьшение расстояния между торцами патрубка.

Коэффициент  $k_\delta$  принимает значения близкие к 1 при  $d_0 / s_0 = 4$  и существенных осевых деформациях ( $\varepsilon = 0,3 \dots 0,4$ ), и близкие к двум при  $d_0 / s_0 = 7$  и  $\varepsilon = 0,05 \dots 0,2$  [1, 2].

По известному виду функции радиус кривизны находится по формуле [7]

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \bigg/ \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1,5}. \quad (6)$$

Длина геометрической оси изогнутой заготовки может быть найдена следующим образом

$$L = l_0 (1 - \delta) = \int_0^{H_k} \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx. \quad (7)$$

Из уравнений (4), (5) и (7) находится параметр  $y_c$ . С учетом вида функции (4) решение может быть найдено численными методами.

Радиус кривизны оси при  $\theta = 3\pi / 2$  найдем из формул (4), (6)

$$\rho_{\min} = \rho \left( \frac{x_c}{2}, \frac{3\pi}{2} \right) = \frac{(H_k w)^2}{y_c}. \quad (8)$$

Условие устойчивого, без образования гофр, деформирования запишем в виде

$$\rho_{\min} \geq \rho_{kp}, \quad (9)$$

где  $\rho_{kp}$  определяется по формуле (3),  $\rho_{\min}$  – по (8), с учетом численных решений относительно  $y_c$ .

Так, для патрубка, показанного на фото (рис. 3, а) деформация оказалась критической с точки зрения образования гофр. Геометрические параметры заготовки (полученные замером) следующие  $d_0 = 22$  мм,  $s_0 = 5$  мм,  $l_0 = 100$  мм,  $H_k = 82$  мм,  $\rho_0 = 30$  мм,  $y_c = 22$  мм, латунь Л98 ( $n = 0,43$ ). Критическое значение  $\rho_{kp} = 28,7$  мм,  $\rho_{\min} = 31,1$  мм, что практически соответствует экспериментальному. Аналогичные данные получены для заготовок, показанных на фото, для которых наблюдается внутренний гофр-зажим (рис. 3 б, в). Таким образом, по условию (9) можно достаточно точно спрогнозировать предельные степени деформаций по критерию гофрообразования (минимальные радиусы изгиба) для их применения в расчетной и производственной практике.

Практический интерес представляет анализ влияние механических свойств металла на гофрообразование, поскольку исходные геометрические параметры должны назначаться с их учетом, исходя из различных предпосылок (отсутствия трещин, смятия, овализация и пр.). Как следует из представленных выше зависимостей, карта материала для этого решения представлена лишь одной величиной – показателем деформационного упрочнения  $n$ . На рис. 4 показано характерное решение по определению критического радиуса кривизны от показателя деформационного упрочнения для тестового примера ( $d_0 = 22$  мм,  $s_0 = 5$  мм,  $l_0 = 100$  мм,  $H_k = 82$  мм). Следует отметить, что зависимость критических радиусов от показателя деформационного упрочнения  $n$  существенна с точки зрения его возможного статистического разброса (с

среднем  $\pm 0,05$ ) для данной марки металла. Поэтому величину  $n$  следует уточнять для конкретной партии заготовок, например, по исходной твердости металла [8]. Следовательно, путем измерения твердости можно разбраковывать обрабатываемый металл по группам и для каждой группы назначать конкретные геометрические параметры – начальную длину и степень осадки. Уточнение последней для металлов из разных партий, в зависимости от показателя деформационного упрочнения, достигает 10...15%, что позволяет получать изделия с прогнозируемой геометрией и существенно повышает эффективность процесса. Также заготовки из металлов с большей способностью к упрочнению могут быть изогнуты на меньшие радиусы, что находит экспериментальное подтверждение в поставленных экспериментах.



Рис. 3. Изогнутые патрубки с гофрами на внутренней части изгиба

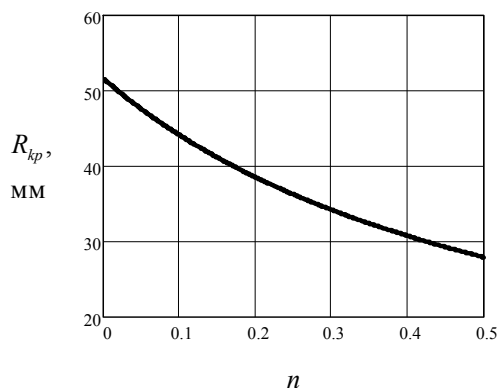


Рис. 4. Зависимость критического радиуса кривизны от показателя деформационного упрочнения

( $d_0 = 22$  мм,  $s_0 = 5$  мм,  $l_0 = 100$  мм,  $H_k = 82$  мм)

### Выводы

Образование гофр в патрубках, изогнутых по схеме сжатия с дальнейшей потерей устойчивости, может быть спрогнозировано с использованием критерия Ю. Н. Алексева расчета критического радиуса изгиба. Методика адаптирована к процессу изгиба с осадкой, что получило экспериментальное подтверждение с погрешностью 10% для исследованных случаев. Зависимость критических радиусов от показателя деформационного упрочнения существенна с точки зрения его возможного статистического разброса для данной марки металла. Предложено путем измерения твердости разбраковывать обрабатываемый металл по группам и для каждой группы назначать конкретные геометрические параметры – начальную длину и степень осадки. Уточнение последней для металлов из разных партий, в зависимости от показателя деформационного упрочнения, достигает 10...15%, что позволяет получать изделия с прогнозируемой геометрией и существенно повышает эффективность процесса. Поэтому величину  $n$  следует уточнять для конкретной партии заготовок, например, по исходной твердости металла [8].

### Литература

1. Кухарь В. В. Формообразование элементов трубопроводов продольным изгибом / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 147–152. – ISBN 966-604-015-8.
2. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев и др. – Мариуполь : Газета “Приазовский рабочий”, 2011. – 336 с.
3. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы : монография / О. А.

Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Грушко и др. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с. – ISBN 966-641-092-3.

4. Грушко О. В. Овалізація перерізу в процесі поздовжнього пластичного згину труби / О. В. Грушко, М. П. Єленіч, В. В. Кухар // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2008. – № 1 (104). – С. 24–28. – ISSN 2226-9150.

5. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1969. – 108 с.

6. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков, 1968. – 188 с.

7. Грушко А. В. Напряженно-деформированное состояние трубчатых заготовок в условиях их пластического продольного изгиба / Н. П. Еленіч, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 163–168. – ISBN 978-966-379-269-9.

8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

9. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала / А. В. Грушко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – № 3. – С. 35–40. – ISSN 2226-9150.

#### References

1. Kuhar' V. V. Formoobrazovanie jelementov truboprovodov prodol'nym izgibom / V. V. Kuhar', A. V. Grushko // Zahist metalurgijnih mashin vid polomok : zb. nauk. pr. – Mariupol', 2010. – Vip. 12. – S. 147–152. – ISBN 966-604-015-8.

2. Analiz plasticheskogo formoizmenenija v chastnyh zadachah kovki i shtampovki: monografija / V. A. Grinke-vich, V. V. Kuhar', M. V. Kraev i dr. – Mariupol': Gazeta "Priazovskij rabochij", 2011. – 336 s.

3. Formoobrazovanie krutoizognutyh otvodov izgibom protjagivaemoj truby : monografija / O. A. Rozenberg, V. A. Ogorodnikov, A. V. Grushko i dr. – Vinnica : UNIVERSUM-Vinnicja, 2004. – 140 s. – ISBN 966-641-092-3.

4. Grushko O. V. Ovalizacija pererizu v procesi pozdovzhn'ogo plastichnogo zginu trubi / O. V. Grushko, M. P. Elenich, V. V. Kuhar // Herald of Khmelnytsky National University, 2008. – № 1 (104). – S. 24–28. – ISSN 2226-9150.

5. Alekseev Ju. N. Vvedenie v teoriju obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem / Ju. N. Alekseev. – Har'kov : Izd-vo Har'k. un-ta, 1969. – 108 s.

6. Alekseev Ju. N. Voprosy plasticheskogo techenija metallov / Ju. N. Alekseev. – Har'kov, 1968. – 188 s.

7. Grushko A. V. Elenich N. P. Naprjazhenno-deformirovanное sostojanie trubchatyh zagotovok v uslovijah ih plasticheskogo prodol'nogo izgiba / N. P. Elenich, A. V. Grushko, V. V. Kuhar' // Udoskonalennja procesiv i ob-ladnannja obrobki tiskom v metalurgії i mashinobuduванні : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2007. – S. 163–168. – ISBN 978-966-379-269-9.

8. Korn G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov : opredelenija, teoremy, formuly / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1973. – 831 s.

9. Grushko A. V. O svjazi ishodnoj tverdosti i krivoj techenija materiala / A. V. Grushko // Herald of Khmelnytsky National University. – Khmelnytsky : HNU, 2009. – № 3. – S. 35–40. – ISSN 2226-9150.

Рецензія/Peer review : 26.12.2014 р.

Надрукована/Printed : 25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., І.О. Сивак

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА РОБОТУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛАТ РЕА

*В роботі досліджувався вплив вібрацій на функціональні плати, визначено власні частоти коливань розрахунковими та експериментальними методами для знаходження резонансів, щоб уникати роботи апаратури у цих режимах.*

*Ключові слова: вібрація, функціональна плата, власна частота коливань.*

L. O. KOVTUN, V. P. ROIZMAN, O. K. JANOVITSKIY  
Khmelnytsky National University

### STUDY OF VIBRATION INFLUENCE ON WORK OF FUNCTION CARDS OF REA

*Abstract – circuit boards, walls of structure, and some other structural elements of products of REA in operating conditions not only themselves may be influenced by vibration and shock loads, but also to transfer these loads are mounted on these blocks, and chips electric radioelements. If wages and other supporting elements experience resonant vibrations, these dynamic loads are increasing many times and can lead to breakdowns or failures due to REA deviation parameters are located on blocks and elements beyond the committed specifications. The work is dedicated to finding the frequencies of the calculated and experimental methods and the possible resonances to avoid malfunction of these regimes.*

*Analysis of the research showed that the range of operating frequencies and circuit boards with complex shape fluctuations, indicating that the strain most boards and modules installed on them.*

*Keywords: vibration, functional plata, the natural frequency of oscillation.*

### Вступ

Функціональні монтажні плати, днища шасі, стінки корпусів і деякі інші конструктивні елементи виробів РЕА в експлуатаційних умовах не тільки самі можуть перебувати під впливом вібраційних та ударних навантажень, але і передавати ці навантаження на змонтовані на них блоки, мікросхеми та електрорадіоелементи. Якщо плати та інші несучі елементи піддаються впливу резонансних коливань, наприклад в системах керування процесами в легкій промисловості [6], то ці динамічні навантаження зростають багаторазово і можуть призвести до поломок або відмов РЕА із-за відхилень параметрів розташованих на них блоків та елементів за межі, що допущені технічними умовами.

Тому особлива увага повинна бути приділена знаходженню власних частот коливань розрахунковими і експериментальними методами, а, отже, і можливих резонансів, щоб уникати роботи апаратури у цих режимах.

Зазвичай, при розрахунках монтажні плати, стінки корпусів та інші плоскі прямокутні конструкції РЕА, розглядають у вигляді еквівалентних їм однорідних прямокутних пластин, теорія коливань яких досить складна, об'ємна, сповнена спрощених припущень і не є завершеною.

Тому нижче ми наведемо лише елементи цієї теорії та основні формули для розрахунку власних частот вільних поперечних коливань прямокутних пластин, без докладних висновків цих формул.

#### 1. Елементи теорії коливань прямокутних пластин

Пластинкою будемо називати геометричний об'єкт, у якого товщина  $H$  не менше, ніж у п'ять разів менше довжини і ширини (рис. 1).

Виберемо прямокутну систему координат, в якій осі  $X$  і  $U$  лежать в серединній площині пластинки, а вісь  $Z$  перпендикулярна цій площині.

Назвемо серединною площиною площину, що рівновіддалена від сторін пластинки: вона ділить товщину пластинки  $H$  навпіл. Саме в цій площині і лежать осі координат  $X$  і  $U$ .

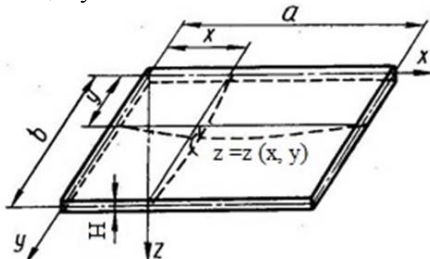


Рис. 1. Умовне зображення пластинки

Під дією поперечного рівномірного інерційного навантаження, пластинка згинається і серединна площина перетворюється на серединну пружну поверхню, яка ділить пластинку на розтягнуту і стиснуту зони, подібно до того, як в балках нейтральні волокна і нейтральна вісь перетину.

Як і для балок, вертикальні переміщення точок серединної поверхні називаються прогинами пластинки і позначаються буквою  $Z$ . Вони обираються малими в порівнянні з товщиною пластинки  $H$ .

Як і для балок, з точністю до другого порядку можна вважати, що волокна серединної поверхні при деформації (вигині) пластинки не змінюють своєї довжини, тобто подібно нейтральній осі і нейтральним волокнам серединна поверхня є нейтральною поверхнею і всі точки серединної поверхні при деформації отримують переміщення в напрямку осі  $Z$ .

Подібно гіпотезі плоских перетинів в теорії вигину балок в теорії пластинок приймається кінематична гіпотеза чи гіпотеза прямих нормалей, відповідно до якої площини, нормальні до серединної

площини пластинки до її деформації залишаються нормальними до неї і при деформації.

Картина деформацій пластинки схожа на картину деформацій балки, але пластинка деформується в двох площинах – XZ і YZ одночасно.

Точки, що належать серединній площині з точністю до малих другого порядку отримують тільки вертикальні переміщення, а саме прогини Z, а точки віддалені від серединної площини по вертикалі на деякій відстані по вертикалі отримують не тільки вертикальні переміщення, а й горизонтальні, які можуть бути розкладені на переміщення – в напрямку осі X і в напрямку осі Y.

Згідно з гіпотезою прямих нормалей, кожна з нормалей до серединної площини при деформації останньої переміщується в просторі як абсолютно жорсткий відрізок, рівний товщині пластинки H. Тобто, щоб визначити положення всіх точок деформованої пластинки потрібно в кожній точці серединної поверхні відновити перпендикуляри довжиною H/2.

Таким чином, якщо отримано рівняння серединної поверхні, то знайдені положення всіх точок пластинки, а значить, і за законом Гука можна знайти всі напруги і вирішувати питання міцності із застосуванням теорій міцності.

Таким чином, основним питанням є знаходження функції, тобто основного рівняння для пластинки.

Вивід цього рівняння ґрунтується на викладених вище гіпотезах, досить громіздкий і його можна, знайти у відповідній літературі, наприклад [1].

Це рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{P}{D} \tag{1}$$

Або ввівши [1] гармонійний оператор, званий оператором Лапласа

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \tag{2}$$

і бігармонійний оператор

$$\Delta \Delta = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \tag{3}$$

Отримують основне рівняння деформацій пластини у вигляді

$$\Delta \Delta z + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{P}{D} \tag{4}$$

де z, см – прогин; P, кг/см<sup>2</sup> – інтенсивність розподіленої по поверхні пластинки навантаження; γ, кг/см<sup>2</sup> – об'ємна вага матеріалу пластинки; g, кг/см<sup>2</sup> – прискорення сили тяжіння; H, см – товщина пластинки;  $D = EH^2 / (12(1 - \mu^2))$  кг•см/см – циліндрична щільність; E – модуль пружності матеріалу пластинки; μ – коефіцієнт Пуансон. Окремі випадки цього рівняння описують більш конкретні питання.

Наприклад, якщо P є функцією часу t, то рівняння (1) описує вимушені поперечні коливання пластинки від змінного за часом розподіленого навантаження, а якщо P не залежить від часу, то вільні, тобто власні поперечні коливання, від постійного навантаження, а якщо P = 0, то отримують рівняння

$$\Delta \Delta w + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \tag{5}$$

описує власні коливання ненавантаженої пластинки.

У задачі про вільні коливання навантаженням є сила інерції  $m \cdot a = \frac{\gamma H}{g} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$ , де a – прискорення, а  $m = \gamma H / g$  погонна маса.

Підставивши цей вираз в (5), отримаємо

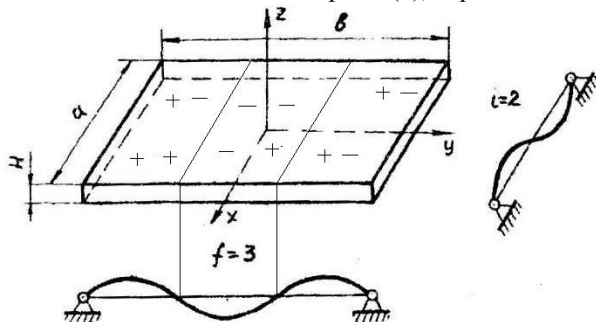


Рис. 2. Розрахункова схема пластини і можливі форми її коливань

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left( \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0 \tag{6}$$

Розв'язок рівняння (6) для випадку, коли всі краї пластини вільно сперті, буде мати вигляд

$$Z(x, y, t) = W(x, y) e^{i\omega_0 t} \tag{7}$$

Амплітудна функція W(x, y) звана власною формою коливань пластини, визначається виразом

$$W(x, y) = A_i f \sin(i\pi x / a) \cdot \sin(f\pi y / b) \tag{8}$$

де a, b - довжина і ширина пластини; i, f - число півхвиль синусоїди в напрямку осей X і Y.

Залежність проілюстрована на рис. 2 – будь-яка пряма паралельна осі X, перетворюється на синусоїду, яка містить в інтервалі (0, a) і напівхвилю (на рис. 2  $i = 2$ ), а пряма, паралельна осі Y -  $f$  напівхвилю (на рис. 2  $f = 3$ ).

Вузловими лініями плата розбита на 6 ділянок та знаки на ділянках показують напрямок вигину ділянок у момент дослідження: знак «+» означає вигин вгору, а знак «-» – вниз, причому знаки, показані зліва вигин у площині ZY, а праворуч – в площині ZX.

Можна побачити, що цей розв'язок задовольняє граничним умовам на контурі

$$z = 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0 \quad \text{і} \quad x = a;$$

$$z = 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при} \quad y = 0 \quad \text{і} \quad y = b,$$

які означають рівність нулю прогинів і згинальних моментів на краях (опорах) пластини.

Підставляючи розв'язок в (6), отримуємо

$$\left(\frac{i\pi}{a}\right)^4 + 2\left(\frac{i\pi}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{f\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{f\pi}{b}\right)^4 = \omega_0 \frac{\rho H}{D}, \tag{9}$$

$$\omega_0 = \pi^2 \left[ (i/a)^2 + (f/b)^2 \right] \cdot \sqrt{D/\rho H}, \tag{10}$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу.

Розглянутий метод визначення власної частоти коливань застосовуємо і для випадку, коли прямокутна плата вільно оперта на двох протилежних краях, що в основному відповідає найбільш часто застосовуваному способу закріплення функціональних плат (ФП) в Т-подібних напрямних (в поверхових конструкціях), при наближеному вирішенні диференціальних рівнянь.

У тих випадках, коли умови закріплення пластин не задовольняють таким вимогам, застосовують наближені методи Релея, Релея-Рітца, Бубнова-Гальоркіна та ін.

Так, наприклад, з рівнянь коливань прямокутних пластин по методу Релея-Рітца можна отримати наступний вираз для власних частот коливань [2, 3]

$$\omega_0 = \frac{C \cdot H}{a^2 \cdot 10^4} \Gamma_{\text{ц}}, \tag{11}$$

де  $H$  - товщина пластини;  $a$  - довжина пластини;  $C$  - частотна постійна:

$$C = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\mu^2) \cdot \rho}}, \tag{12}$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\rho$  – щільність матеріалу;  $a$  – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення сторін пластини.

Значення частотної постійної  $C$ , знайденої на основі методу Релея-Рітца з урахуванням різних варіантів закріплення плат (рис. 3), наведено в табл. 1. Коефіцієнт  $a$  узятий із розрахунку пластин І. А. Орловської.

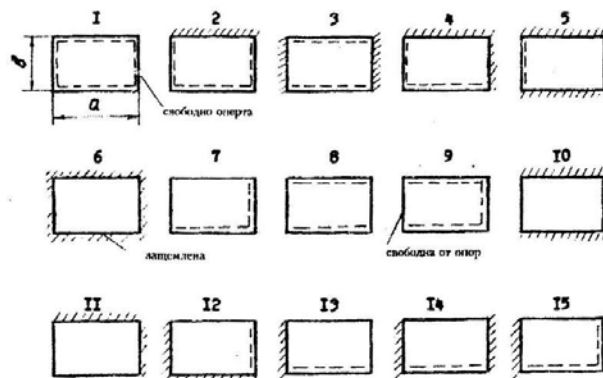


Рис. 3. Схеми закріплення пластини

Якщо пластина виготовлена не зі сталі (як, наприклад, функціональна плата), то у вираз (11) вводиться поправочний коефіцієнт на матеріал:

$$K_M = \sqrt{\frac{E \cdot \rho_c}{E_c \cdot \rho}}, \tag{13}$$

де  $E$  та  $E_c$  – модулі пружності відповідно матеріалу плати і сталі;  $\rho$  і  $\rho_c$  – щільність матеріалу і сталі, які застосовуються.

Таблиця 1

Схема закріплення пластини	Значення частотної постійної С							
	Відношення сторін пластини a/b							
	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
1.	25	29	47	76	117	170	234	375
2.	25	31	56	101	165	245	347	603
3.	54	56	69	93	131	181	244	406
4.	38	42	65	107	170	251	351	607
5.	33	44	76	139	230	349	494	866
6.	54	48	86	145	234	352	497	868
7.	2	4	8	13	17	21	25	34
8.	8	16	38	70	112	165	230	394
9.	4	10	28	58	99	151	216	380
10.	10	19	58	124	217	336	479	855
11.	9	11	18	28	43	62	85	144
12.	10	16	42	88	152	134	335	591
13.	9	10	13	18	23	28	33	43
14.	5	16	56	122	215	335	481	853
15.	5	12	40	86	150	233	333	590

Якщо функціональна плата, яка несе на собі радіоелементи, рівномірно навантажена, то у вираз (11) вводять поправочний коефіцієнт на вагу елементів:

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_3 / Q_n}}, \quad (14)$$

де  $Q_3$  – вага елементів розміщених на платі;  $Q_n$  – вага плати.

З урахуванням наведених поправок, формулу для наближеного визначення 1-ї власної частоти коливань рівномірно навантаженої функціональної плати можна записати у вигляді:

$$\omega_0 = \frac{K_M \cdot K_B \cdot C \cdot H}{a^2} \cdot 10^4 \text{ Гц}. \quad (15)$$

Наведемо у якості прикладу, запозичені з [3] значення поправочного коефіцієнта  $K_M$  для деяких матеріалів (табл. 2) і коефіцієнта  $K_B$  на вагу елементів, рівномірно розподілених по пластині (табл. 3).

Таблиця 2

Значення поправочного коефіцієнта $k_M$ для деяких матеріалів	
Матеріал	$k_M$
Сталь	1
Молібден	1,1
Сплави магнію	0,97
Алюмінієві сплави	0,95
Титан	0,93
Гетинакс	0,54
Епоксидна смола	0,52
Фенольна смола	0,47

Таблиця 3

Значення поправочного коефіцієнта $k_M$ для різних співвідношень ваги елементів і пластини								
Оз/Оп	1	2	4	6	8	10	12	24
$k_M$	0,71	0,6	0,44	0,38	0,33	0,3	0,28	0,2

Однак, на практиці власні частоти коливань плат часто не збігаються з величинами, знайденими розрахунковим шляхом в силу ряду інших причин: наявності навісного монтажу на платах і нерівномірного його розподілу за площею; наявності струмопровідних доріжок, що призводить до зміни характеристик жорсткості плати; неможливістю розрахунку зусиль затягування при закріпленні плат в блоці і т. п.

Крім того, через зв'язаність коливань, при резонансах одні елементи втягують в коливання інші (значить, змінюються і маси, і жорсткості і т. п.). Отже, знайдені розрахунковими методами значення власних частот коливань матимуть наближене значення, а більш точні їх значення можна отримати лише експериментальними методами.

## 2. Визначення форм і частот коливань плат та інших виробів експериментальними методами

Експериментальне визначення динамічних характеристик друкованих плат зазвичай проводиться на віброустановці і вимагає певної навички, великих витрат електричної енергії, при цьому оператор знаходиться під впливом електромагнітних полів і шумів різної інтенсивності.

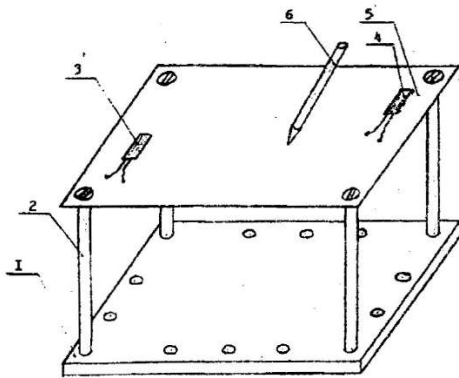


Рис. 4. Установка для експериментального визначення форм і частот коливань плат

Нами розроблена експериментальна установка для визначення форм і частот коливань друкованих плат та інших деталей РЕА. Установка (рис. 4) складається з масивної підстави 1 і чотирьох (або шести) стійок 2.

Випробувана плата 5 чи інша деталь радіоелектронного виробу, яку можна віднести до пластин, кріпиться до стійок, або встановлюється в напрямні таким же чином, як і в експлуатаційних умовах.

Для створення механічних коливань плати використовується зворотний п'єзоелектричний ефект [4]. До п'єзокристалу 3, який приклеюється в зручному місці на платі (краще з нижньої сторони) підводиться синусоїдальна напруга від звукового генератора. Для визначення резонансних частот коливань використовується п'єзокристал 4, приклеєний до плати (прямий п'єзоелектричний ефект). Своїми виводами цей кристал приєднується до електронного осцилографу та електронного частотоміру (цифровому).

Про резонанси плати судять за максимальним значенням амплітуди напруг другого п'єзокристалу, а про форму – шляхом обходу плати п'єзошупом або п'єзоолівцем 6.

Переваги даної установки полягають у тому, що тут не потрібно високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, малі витрати електричної енергії, при цьому оператор не схильний до дії електромагнітних полів і шумів різної інтенсивності.

Установка може бути виготовлена практично в будь-якій майстерні і її вартість значно нижче вартості промислової віброустановки.

Підставка виготовляється зі сталі або чавуну, стійки зі сталі. Якщо ж плата в радіовиробі кріпиться іншим способом, то замість стійок 2 на підставу встановлюються опори, що відповідають тим, або іншим умовам закріплення.

Показана на рис. 4 установка була багаторазово використана нами при вібродослідженнях ряду плат і корпусних деталей РЕА.

Перевага цього методу полягає в тому, що він дає можливість визначення форм і частот коливань не тільки в лабораторних умовах, а й безпосередньо на місці установки апаратури.

Для визначення форм коливань функціональних плат, корпусних деталей, ІМС та інших деталей пропонується, також, наступний майже забутий метод Гука-Хладні.

Ернест Флоренс Фрідріх Хладні – німецький (словацького походження) фізик і дослідник метеоритів, музикант, член-кореспондент Петербурзької Академії наук у XVIII столітті повторив експерименти англійського вченого Роберта Гука, який в 1680 році в Стендфордському університеті, водячи смичком по краю пластини, що покрита борошном, помітив, як відбувається деформація пластини.

У XX столітті замість смичка стали використовувати гучномовець з електричним генератором, що стоять під пластиною, щоб більш точно налаштувати частоту.

Складні малюнки, утворені вузловими лініями піску або борошна, на тонких пластинках Хладні вивчав більш серйозно, ніж Гук, і вони увійшли в історію під назвою фігур Хладні.

Ця ідея Гука-Хладні була використана нами для вивчення форм коливань реальних функціональних плат РЕА на описаній вище установці.

Змочену гасом поверхню досліджуваної деталі (плати, ІМС та ін.) посипають дрібним кварцом. Змінюючи частоту збурюючої сили помічають, що при деяких частотах амплітуди коливань різко зростають. Це вказує на збіг частот збурюючих навантажень і власних частот коливань, тобто на резонанс. При цьому в місцях пучностей коливань піщинки скидаються в ті місця, де плата не коливається, тобто у вузли коливань. Там піщинки залишаються в спокої, позначаючи вузли коливань. У цих місцях шукають і найбільші напруження. Даним методом були визначені форми і частоти коливань функціональних плат з мікромодулів 4-х типорозмірів для чотирьох варіантів розташування плати, а також визначено форми і частоти коливань корпусних деталей базової несучої конструкції в трьох взаємно напрямках.

Приклади знайдених вузлів коливань функціональних плат показані на рис. 7.5 ... 7.19 при різних положеннях плати та модулів:

Таким чином, розташування кварцу при резонансних коливаннях показувало на вузли, а, отже, дозволяло уявити саму форму коливань. Крім того, на функціональних платах та мікромодулях кожного типорозміру закріплювали за допомогою епоксидної смоли (або пластиліну) п'єзокристали, сигнали від яких надходили на двопробний осцилограф С1 -18. Це давало можливість візуально спостерігати момент виникнення резонансу плат і модулів, встановлених на цих платах, робити порівняння амплітуд і фаз коливань. Результати спостережень, отримані при плавній зміні збуджуючої частоти від 20 до 5000 Гц по кожній платі окремо, для різних ФП наведено в табл. 4... 7.

Таким чином, як видно з табл. 4... 7 на випробувальних платах і ФП у всьому діапазоні частот, при дослідженні на вібростійці за технологією № НГО.005.024.ТУ, є широкий спектр резонансних частот. Так, наприклад, у ФП типу ЗУ41, розташованих горизонтально - виявлено 10 резонансів, а при вертикальному розташуванні ММ- 22 резонанси.



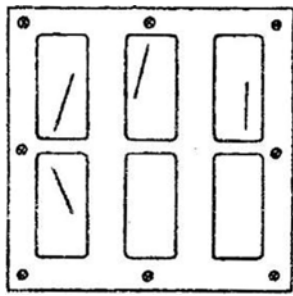


Рис. 5. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0=2783$  Гц

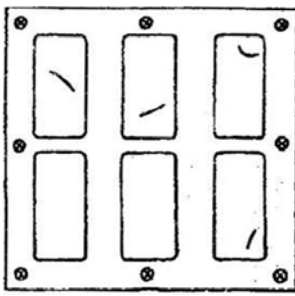


Рис. 6. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 3373$   
Гц

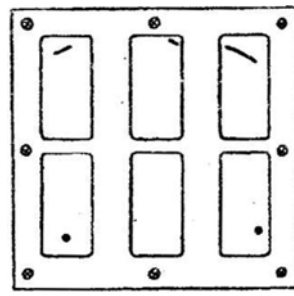


Рис. 7. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0=3501$  Гц

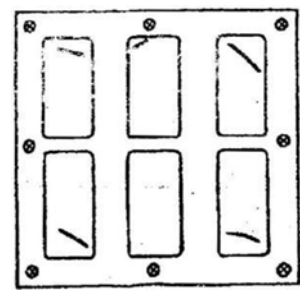


Рис. 8. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 3666$   
Гц

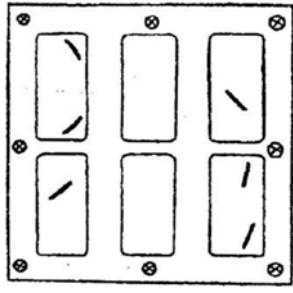


Рис. 9. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 2580$   
Гц

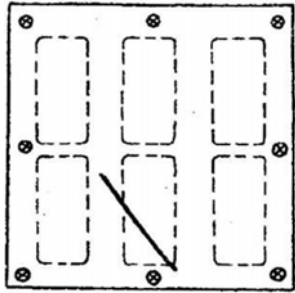


Рис. 10. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 2061$   
Гц

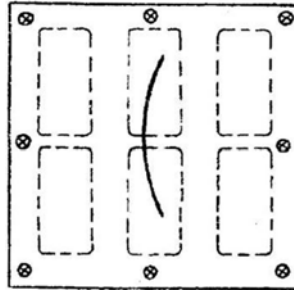


Рис. 11. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0=2227$  Гц

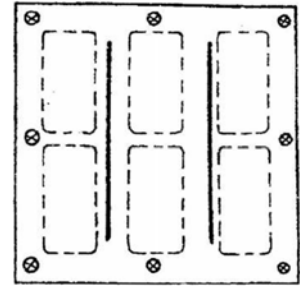


Рис. 12. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 2799$   
Гц

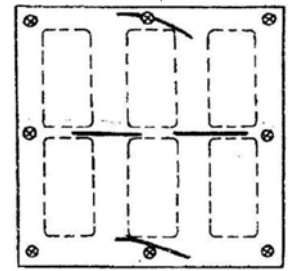


Рис. 13. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 3336$   
Гц

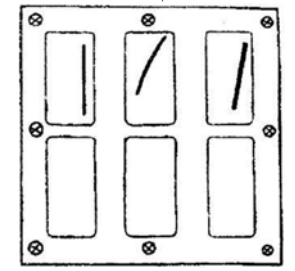


Рис. 14. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 2798$   
Гц

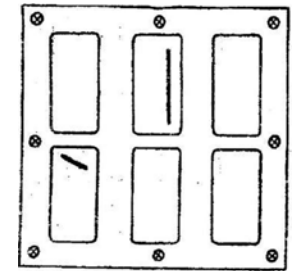


Рис. 15. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0=2354$  Гц

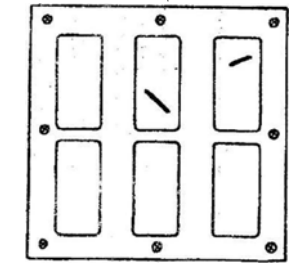


Рис. 16. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 4107$   
Гц

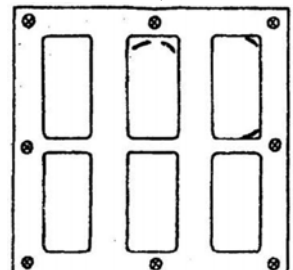


Рис. 17. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 4652$   
Гц

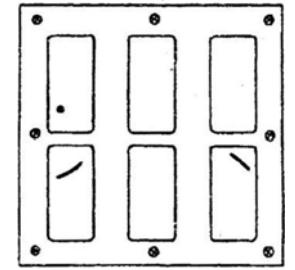


Рис. 18. Розташування вузлів  
коливань ФП при  $\omega_0 = 2122$   
Гц

- а) горизонтально модулями вгору (рис. 5... 8);  
б) горизонтально модулями вниз (рис. 9 ... 13);  
в) вертикально з вертикальним розташуванням  
довгого ребра модуля (рис. 14...15);  
г) вертикально з горизонтальним розташуванням  
довгого ребра модуля (рис. 16 ... 18).

Аналогічна картина має місце і у мікромодулів інших типів. Знайдені резонансні частоти близькі, а іноді й збігаються з частотами, на яких проводяться вібровипробування за технологією ПГ0.005.024 ТУ. Отримані, за допомогою двопробеневого осцилографа С1-18, результати дали можливість визначити зразкове співвідношення амплітуд коливань ФП і об'єднуючих плат. У більшості випадків [5] амплітуди коливань ФП при резонансах були більше амплітуд коливань плат, перевершуючи їх іноді в 20 ... 50 разів.

У деяких випадках амплітуди плат перевищували амплітуди коливань модулів в 1,5...15 разів або були однакові.

Наявність настільки великої кількості резонансних частот у ІМС і об'єднуючих плат можна пояснити тим, що як ІМС так і плати з'єднуються з пристосуванням для випробувань не досить жорстко, а саме пристосування, як було встановлено раніше, теж має ряд резонансних частот в діапазоні 0...5000 Гц.

Слід також мати на увазі, що випробування мікромодулів і функціональних плат проводилося при їх закріпленні на пристосуванні ЩВ 1810-4358 ММ, у якого було виявлено 6 резонансних частот в діапазоні 0...5000 Гц (табл. 8).

Таблиця 4

**Власні частоти коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ФП – плати – пристосування – вібростол**

ЗУ 41 горизонт. плата			ЗУ 41 вертикал. ліва			ЗУ 41 вертикал права		
плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
150			318			470		
180				632	1/1	692		10/1
244								
				1031			754	1/3
262				1094			936	1/2
438				1267	1/20		1182	
530'	530*			1600	1/8		1305	
	761	1/15		1909	1/5		1175*	
	868	1/10		2131	1/7,5	141		
	1186	1/2		2807			1665	
	1272	1/1		3289			1891	1/1
	2174	2/1		3513	1/10		2199	1/2
	2621	1/2		3648	1/5	265		10/1
2802		5/1		4060	1/50	329		15/1
3053		2/1	4286			345		2/1
	3702	1/3				376		7/1
	4027	1/1				409		2/1
	4310	1/2,5					4245	1/1
4705		1,5/1					4254	1/1,5
						457		10/1
							4732	3/1

Таблиця 5

**Власна частота коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ФП – плати – пристосування – вібростол**

ПІ59 горизонт. плата		ПІ59 вертикал. ліва			ПІ59 вертикал. права		
плата	модуль	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
672'	672'		651		920	920	1/10
	955		773		1004	1004	1/40
1265	1265	1001	1001	1/2		1633	1/20
	1350	1199	1199	1/4	1881	1881	1/6
1502	1502	1270	1270	1/3	2136	2136	1/3
	1555	1348	1348	7/10	3222	3222	1/10
1634	1634	1552	1552		3633	3633	1/15
2123		1825	1825	2/1	4006	4006	1/3
2379	2379	1866	1866		4413		
2810	2810	2163*	2163				
	3192	2382	2382				
			2950				
3672	3672	3580					
3994	3994*	4073					

Таблиця 6

**Власна частота коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ММ – плати – пристосування – вібростол (\* – власні частоти з найбільшими амплітудами коливань)**

ЗУ 41 горизонт. плата			ЗУ 41 вертикал. ліва			ЗУ 41 вертикал. права		
плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
750	750*		802			124		15/1
	1285		1163			134		4/1
1576	1576	1/20	1318		1/4		1605*	1/5
	1849	1/10	1630		1/10	184	1840	1/1
2113	2113	1/5	1904		1/15	190	1908	1/1
2280		4/1	2097		1/15	207	2078	1/3
	2464	1/25		2119	1/17		2376	1/10

Продовження табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	3220	1/10	2310*	2310			2472	1/7,5
	3374	1/8		2400	1/4		2706	1/8
	3674	1/25	2472	2472	1/10		2892	1/1
	3954	1/25	2677	2677	1/2	373		3/1
	4625	1/20	2848	2848	1/20		4232	1/4
	4961			2870	1/6			
				3164	1/10			
			3459		1/3			
				3650	1/20			
			3620		1/7			
			4024		1/15			
			4516	4516				
			4959	4959				

Таблиця 7

**Власні частоти коливань плоских мікромодулів ІТ32 і функціональних плат в системі ММ – плати – пристосування – вібростол (\* – власні частоти з найбільшими амплітудами коливань)**

ІТ32 горизонтальна плата - модуль	ІТ32 вертикальна плата - модуль
659	659
1094	1094
1624	1625
2132	1810
2332	2137
2815*	2406
3559	2804
4091	3291
3501	

Таблиця 8

**Резонансні частоти пристосування ЦВ 1810-4358 ММ, встановленого на столі вібростенда УВЕ 10/5000**

Резонансна частота, Гц					
1100	1500	1900	2100	3600	4250

Хмельницький, 1988. – С. 88-89.

6. 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.

## Висновки

Аналіз результатів досліджень показує, що в діапазоні експлуатаційних частот і функціональні плати і ММ мають складні форми коливань, що говорить про деформації самих плат, так і встановлених на них модулів.

## Література

1. Писаренко. Сопrotивление материалов / Писаренко. – К. : Техника, 1967.
2. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / Карпушин В. Б. – М. : Сов. радио, 1971. – 344 с.
3. Токарев М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / Токарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Нестер Н. А. Применение пьезокристаллов для исследования форм и частот колебаний печатных плат / Н. А. Нестер, В. П. Ройзман, М. И. Хавкин // Теория и практика конструирования и обеспечения надежности и качества РЭА. – Москва, 1978. – С. 100.
5. Нестер Н. А. Пути повышения качества контроля технологического процесса испытаний изделий РЭА / Н. А. Нестер, М. И. Хавкин // Материалы 14 межвузовского научно-методического семинара.

## References

1. Pisarenko. Soprotyvlenie materialov Tehnika, Kiev, 1967.
2. Karpushin V. B. Vibracii i udary v radioapparature. M. : Sov. radio, 1971. – 344 s.
3. Tokarev M. F., Talickij E. N., Frolov V. A. Mehanicheskie vozdejstviya i zashhita radiojelektronnoj apparatury. – M. : Radio i svjaz', 1984. – 224 s.
4. Nester N. A., Rojzman V. P., Havkin M. I. Primenenie p'ezokristallov dlja issledovaniya form i chastot kolebanij pechatnyh plat. V kn. : Teorija i praktika konstruirovaniya i obespecheniya nadezhnosti i kachestva RJeA. Moskva, 1978, – S. 100.
5. Nester N. A., Havkin M. I. Puti povysheniya kachestva kontrolja tehnologicheskogo processa ispytaniy izdelij RJeA. Materialy 14 mezhvuzovskogo nauchno-metodicheskogo seminar. Hmel'nickij, 1988. – S. 88-89.
6. Gorjashhenko K.L., Gorjashhenko S.L. Tendencii razvitu suchasnoj silovoj elementnoj bazi dlja keruvannya pristrojami legko promislovosti. Herald of Khmelnytsky National University. – 2004. – № 5. – Ch.1. – S. 174-177

Рецензія/Peer review: 2.12.2014 р. Надрукована/Printed: 19.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.

**СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ  
ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ**

*Розглянуто структурне дослідження складних плоских механізмів четвертого класу зі ступенем вільності  $W=1$ , що базуються на основі різних можливих видів групи Ассура четвертого класу третього порядку, які ураховують кількість і певний характер кінематичних пар групи Ассура та їх місце розташування в групі. Структурний аналіз зроблено за допомогою способу умовної зміни ведучої ланки механізму, який дозволяє отримати формули будов кінематично-еквівалентних механізмів другого класу, що дозволяє з'ясувати послідовність визначення кінематичних параметрів точок та ланок механізмів четвертого класу, спростити кінематичний аналіз та збільшити точність результатів дослідження.*

*Ключові слова:* група Ассура, механізм, структурна формула, ланка.

S.O. KOSHEL, A.V. KOSHEL  
Kiev National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

**STRUCTURAL ANALYSIS OF COMPLEX FLAT MECHANISMS FOURTH CLASS**

*Abstract - Structural study of complex planar mechanisms fourth class with degree of freedom  $W = 1$ , which are based on different possible types of Assur fourth class of third order, which take into account the number and nature of a kinematic pairs of Assura and their location in the group. The basic types of groups Assur fourth class of third order, to which received six mobile links and nine kinematics pairs of rotational and translational nature, which differ from one another the number and location of kinematic pairs specific character. Make structural analysis mechanisms on the basis of identified species groups Assur fourth class of third order for one of the other possible option selected entry mechanism. Problem solved taking into account the structure of formula features a mechanism to change the appearance depending on the chosen arbitrarily other leading link and using the basic mechanisms of the theory of the structure of the course the theory of mechanisms and machines. Formulas of structures mechanisms fourth grade for the various possible types of Assur fourth class of third order. The structure formulas of structures mechanisms of Assur come only second class, which allows you to set a sequence of study mechanisms fourth class, which greatly simplifies problem solving kinematic analysis of mechanisms.*

*Keywords:* group Assur, mechanism, structural formula, link.

**Вступ**

Сучасні умови ринкових відносин вимагають від виробників обладнання легкої промисловості конкурентоспроможної продукції. Одним з основних параметрів, що впливає на продуктивність машин є швидкість (частота обертання) головного валу машини. В зв'язку з цим при проектуванні механізмів і машин важливу роль приділяють кінематичним та пов'язаними з ним силовими дослідженнями.

Механізми сучасного технологічного обладнання легкої промисловості відносяться до складних швидкісних механізмів, в яких використовуються структурні групи вищих класів. Це обумовлено складністю технологічного процесу утворення виробів у робочій зоні машини, для забезпечення якого необхідні специфічні складні рухи робочих органів машини, що в свою чергу вимагає від інженерів використання структурних груп вищих класів для проектування схем механізмів таких машин.

**Постановка завдання**

Виконати структурне дослідження механізмів четвертого класу на основі різних можливих видів груп Ассура четвертого класу третього порядку з урахуванням властивості механізмів змінювати клас в залежності від обраної вхідної ланки.

**Аналіз досліджень та публікацій**

В машинах легкої промисловості широке розповсюдження мають механізми третього класу за класифікацією Ассура [1]. На відмінність від механізмів другого класу, до складу яких надходять групи Ассура такого ж класу п'яти різних видів, механізми четвертого класу на базі груп Ассура 4-го класу 3-го порядку не мають певної класифікації їх видів. Така «невизначеність» призводить до складнощів, які пов'язані з наступними кінематичними та подальшими динамічними дослідженнями механізмів. Якщо урахувати те, що кінематичне дослідження груп Ассура третього та вище класів вимагає використання спеціальних методів дослідження [1, 2, 3], стає зрозумілим прагнення дослідників спростити такі дослідження за допомогою структурної заміни механізмів вищих класів кінематично-еквівалентними механізмами нижчих класів. В формулах будов зазначених механізмів присутні групи Ассура другого класу, ступінь вільності та кінематичні параметри точок ланок механізму залишаються незмінними. Таке стає можливим, якщо в механізмі вищого класу зі ступенем вільності  $W=1$  умовно змінити ведучу (вхідну) ланку механізму [4].

**Формулювання цілей**

Отримати формули будов механізмів четвертого класу для різних можливих видів групи Ассура четвертого класу третього порядку за умови обраного можливого іншого початкового механізму, що дозволяє спростити вирішення кінематичного аналізу таких механізмів.

Результати та їх обговорення

Розглянемо різні види груп Ассур четвертого класу третього порядку, що складаються з шести ланок (2, 3, 4, 5, 6, 7) та дев'яти кінематичних пар  $A_1 - A_9$  (пари  $A_1, A_7, A_9$  – зовнішні,  $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_8$  – внутрішні) (рис. 1–5).

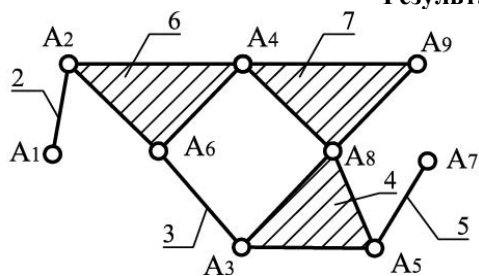


Рис. 1. Група Ассур 4-го класу 3-го порядку з дев'ятьма обертальними кінематичними парами

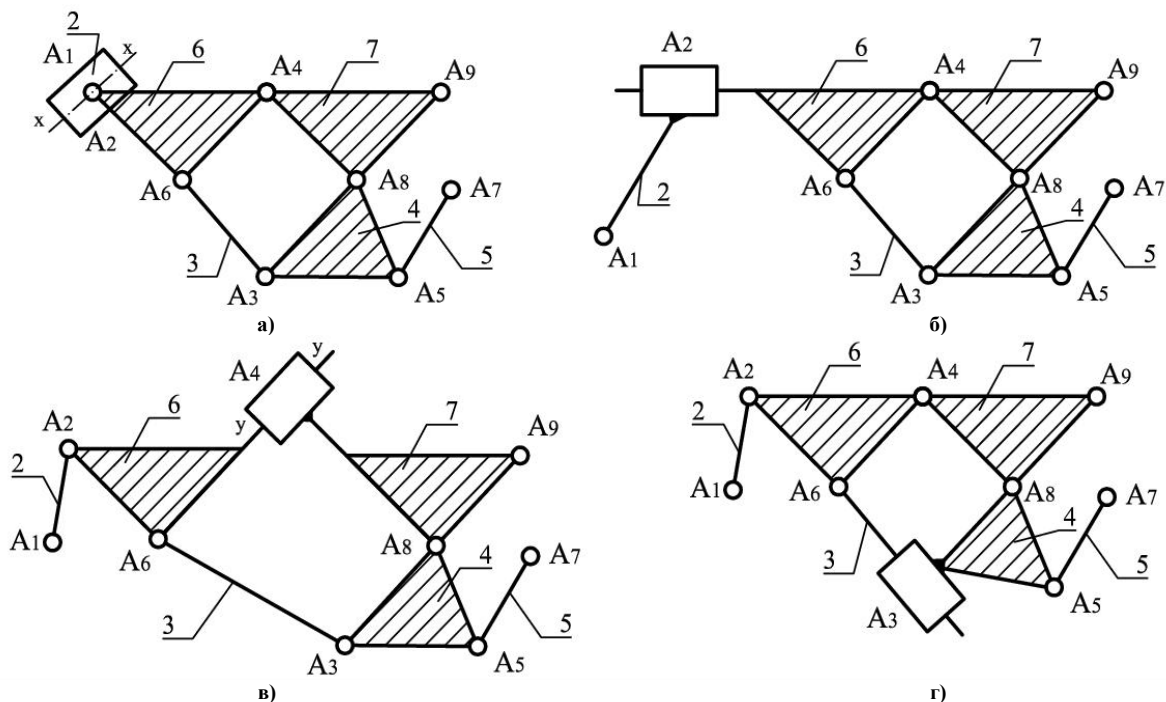


Рис. 2. Групи Ассур четвертого класу третього порядку з восьмими обертальними та однією поступальною кінематичними парами: а – з зовнішньою поступальною парою; б, в, г - варіанти з внутрішньою поступальною парою

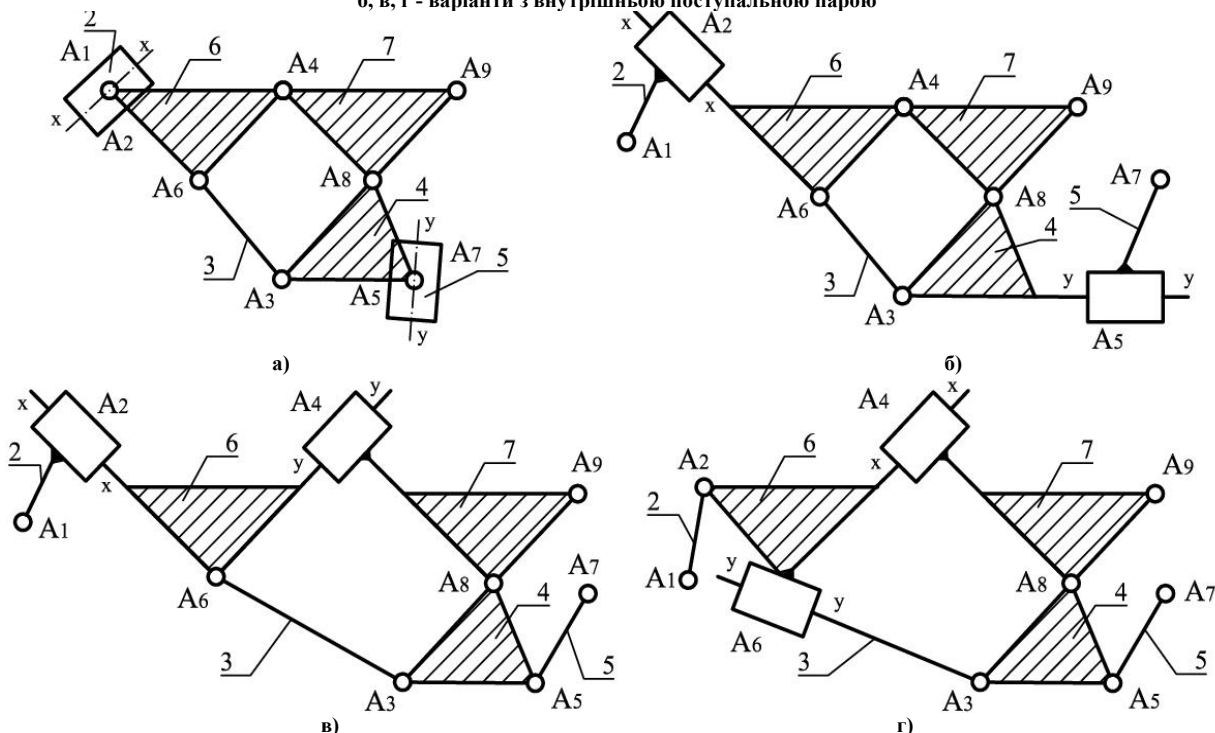


Рис. 3. Групи Ассур четвертого класу третього порядку з сьома обертальними та двома поступальними кінематичними парами (вісі  $xx, yy$  не є паралельними): а – з двома зовнішніми поступальними парами; б, в, г – варіанти з двома внутрішніми поступальними парами

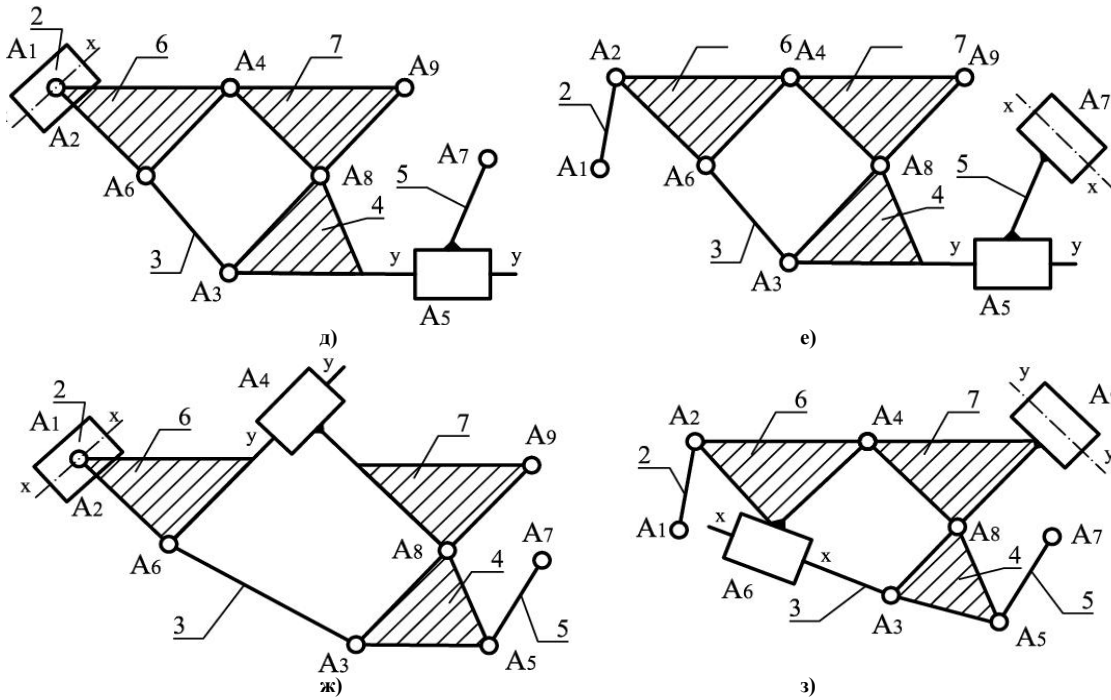


Рис. 3. (продовження) Групи Ассур четвертого класу третього порядку з сьомма обертальними та двома поступальними кінематичними парами (вісі  $xx$ ,  $yy$  не є паралельними): д, е, ж, з – варіанти з однією внутрішньою та однією зовнішньою поступальними парами

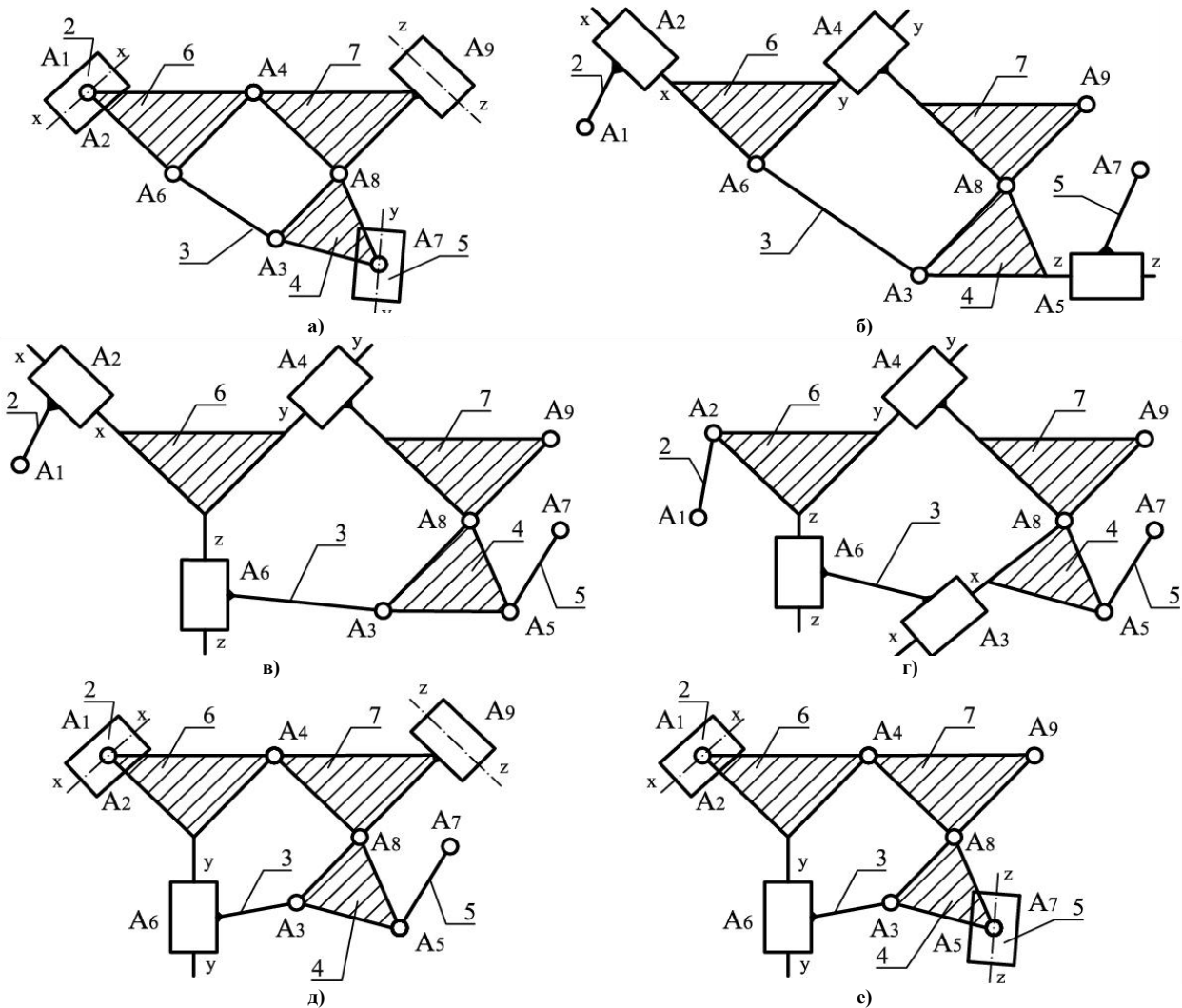


Рис. 4. Групи Ассур четвертого класу третього порядку з шістьма обертальними та трьома поступальними кінематичними парами (вісі  $xx$ ,  $yy$ ,  $zz$  не є паралельними): а – з трьома зовнішніми поступальними парами; б, в, г – варіанти з трьома внутрішніми поступальними парами; д, е – варіанти з двома зовнішніми та однією внутрішньою поступальними парами

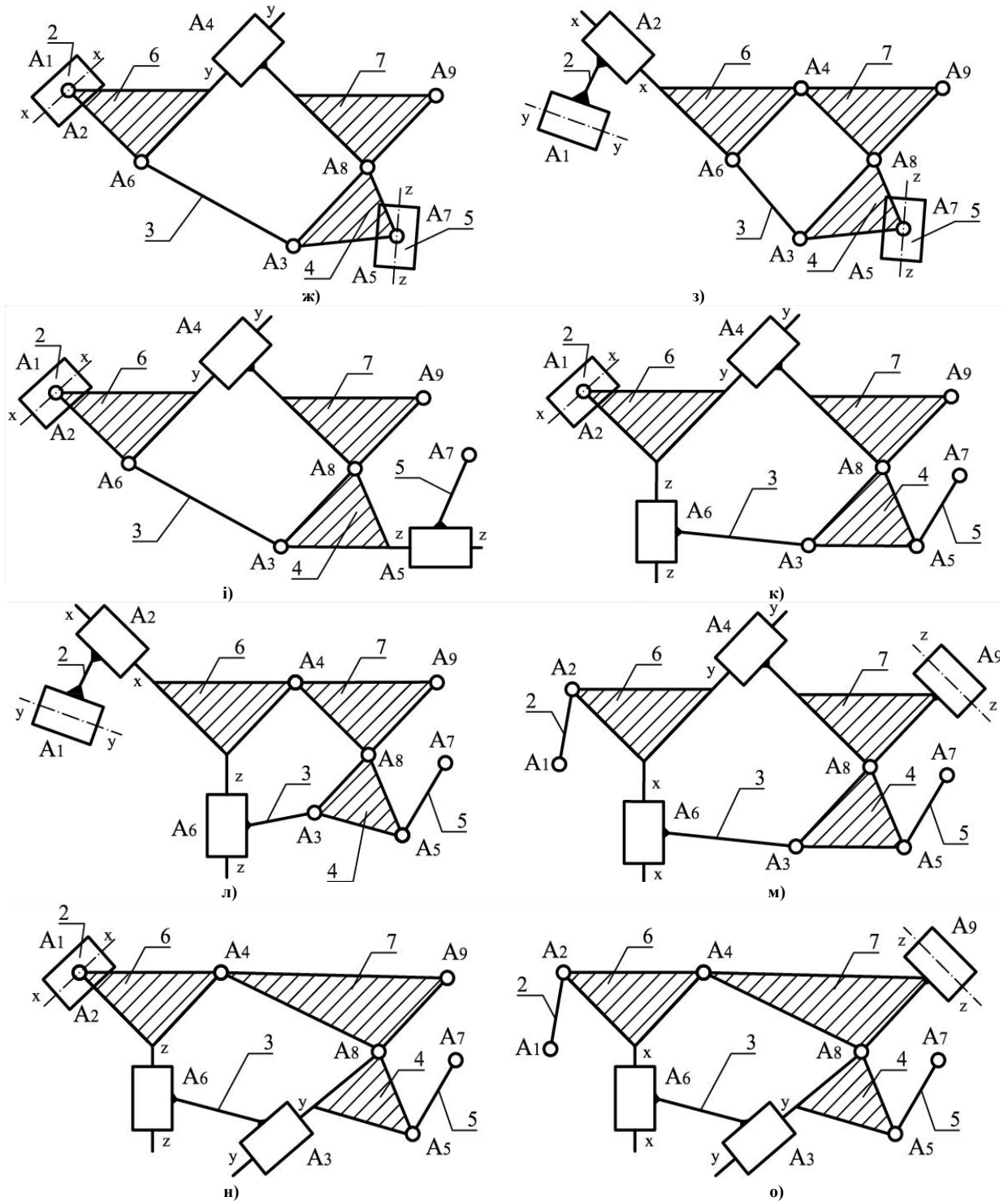


Рис. 4. (Продовження) Групи Ассур четвертого класу третього порядку з шістьма обертальними та трьома поступальними кінематичними парами (вісі  $xx, yy, zz$  не є паралельними): ж, з – варіанти з двома зовнішніми та однією внутрішньою поступальними парами; и, к, л, м, н, о – варіанти з однією зовнішньою та двома внутрішніми поступальними парами

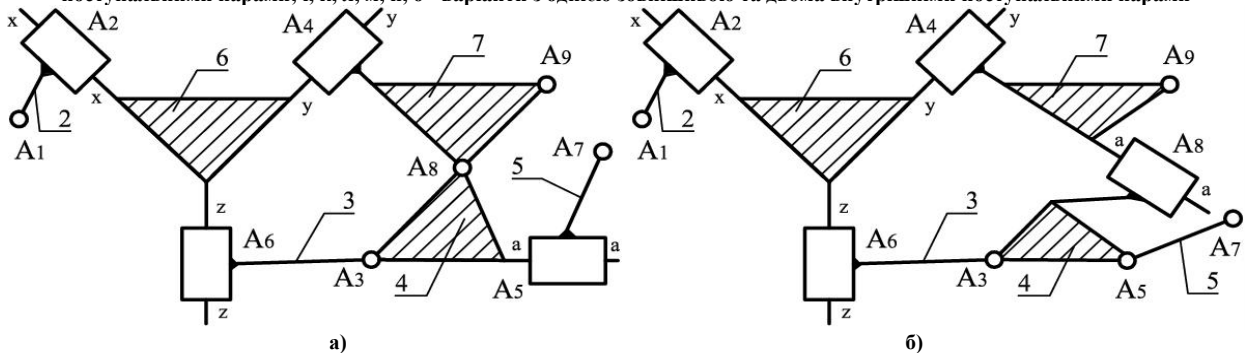


Рис. 5. Групи Ассур четвертого класу третього порядку з п'ятьма обертальними та чотирма поступальними кінематичними парами (вісі  $xx, yy, zz, aa$  не є паралельними): а, б – варіанти з чотирма внутрішніми поступальними парами

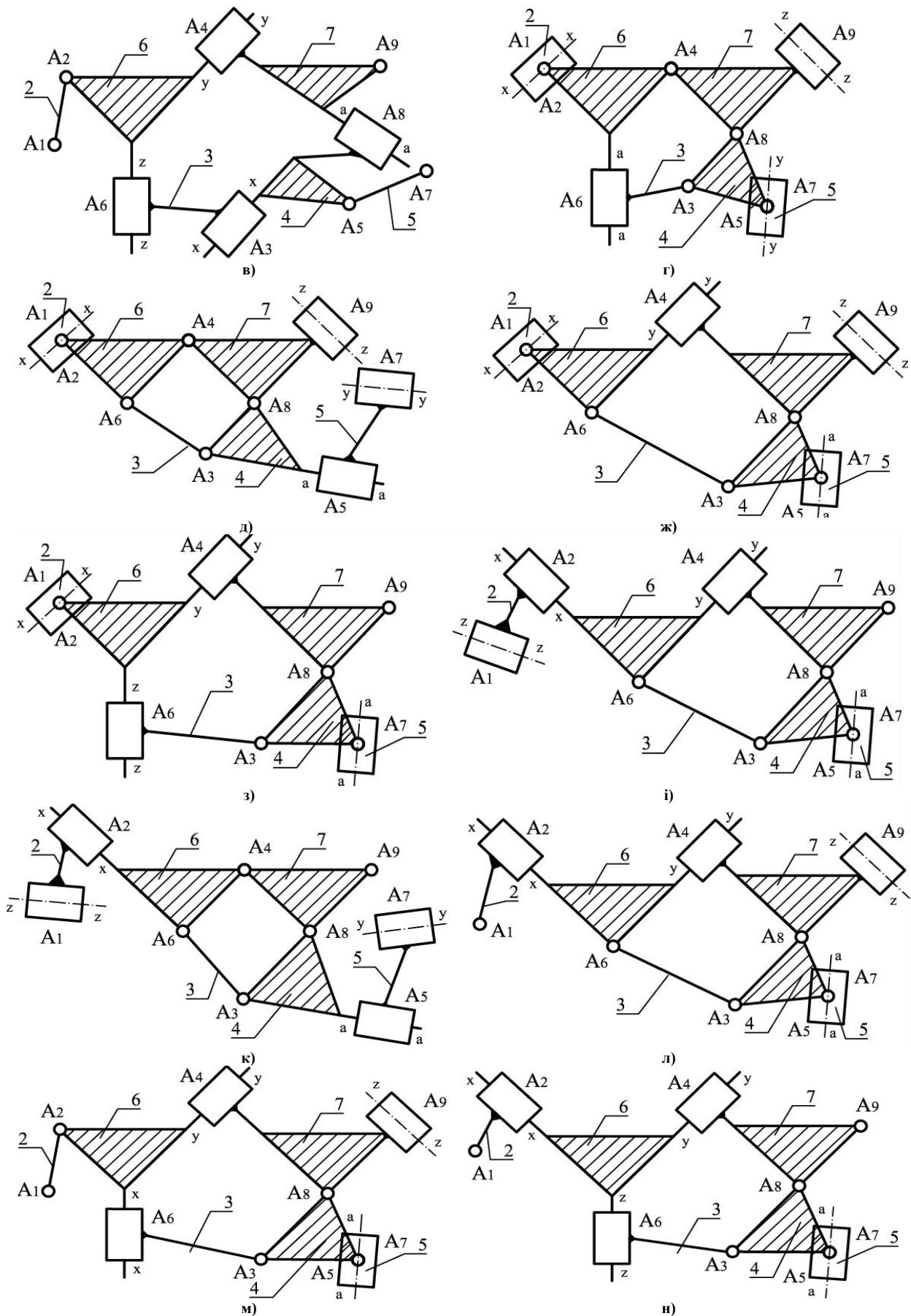


Рис. 5. (продовження) Групи Ассур четвертого класу третього порядку з п'ятьма обертальними та чотирма поступальними кінематичними парами (вісі  $xx$ ,  $yy$ ,  $zz$ ,  $aa$  не є паралельними): в – варіанти з чотирма внутрішніми поступальними парами; г, д, ж – варіанти з трьома зовнішніми і однією внутрішньою поступальними парами; з, і, к, л, м – варіанти з двома зовнішніми і двома внутрішніми поступальними парами; н – варіанти з однією зовнішньою і трьома внутрішніми поступальними парами



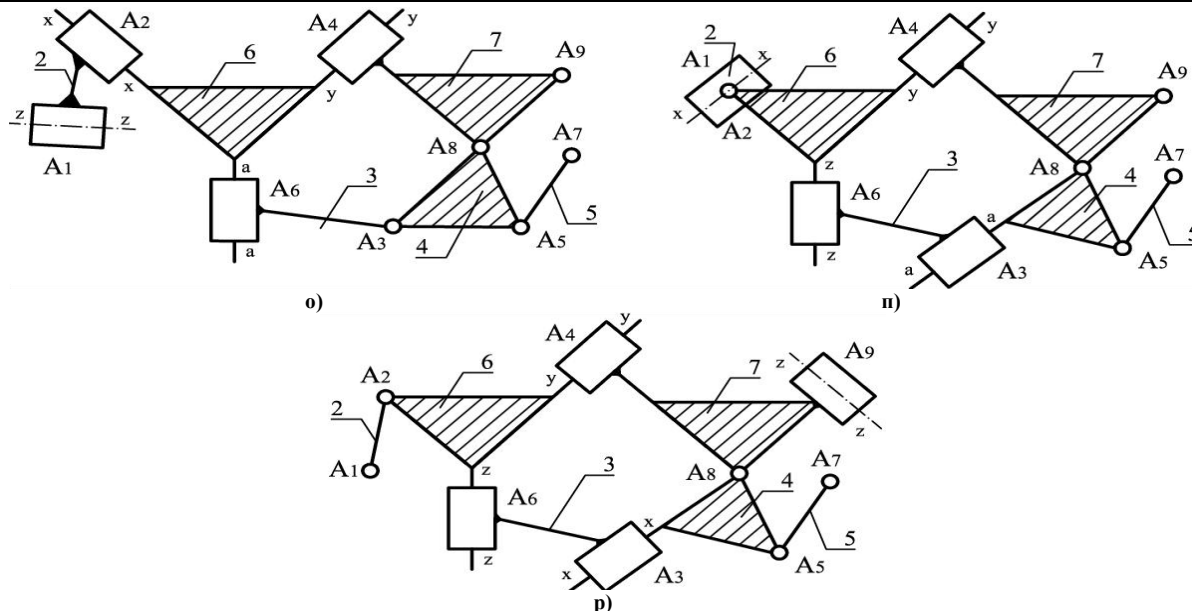


Рис. 5. (продовження) Групи Ассура четвертого класу третього порядку з п'ятьма обертальними та чотирма поступальними кінематичними парами (вісі xx, yy, zz, aa не є паралельними): о, п, р – варіанти з однією зовнішньою і трьома внутрішніми поступальними парами

**Формули будов умовних кінематично-еквівалентних механізмів для різних модифікацій груп Ассура третього класу четвертого порядку**

Формули будов умовних кінематично-еквівалентних механізмів	
Для варіанту рис. 1	
1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
Для варіантів рис. 2	
а) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
б) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)	
в) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
г) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
Для варіантів рис. 3	
а) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
б) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 3вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)	
в) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)	
г) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
д) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 3вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
е) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 5вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
ж) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
з) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 3вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
Для варіантів рис. 4	
а) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
б) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 3вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)	
в) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)	
г) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 6вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)	
д) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 3вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
е) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 3вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
ж) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
з) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 5вид(1,2)	
і) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 3вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
к) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)	
л) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 3вид(3,6) → 2клас 2порядок 5вид(1,2)	

- м) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)  
 н) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 о) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)

Для варіантів рис. 5

- а) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 3вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)  
 б) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)  
 в) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 6вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)  
 г) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 3вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 д) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 5вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 ж) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 з) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 і) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 5вид(1,2)  
 к) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 5вид(4,5) → 2клас 2порядок 1вид(3,6) → 2клас 2порядок 5вид(1,2)  
 л) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 2вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)  
 м) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)  
 н) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 2вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 2вид(1,2)  
 о) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 5вид(3,6) → 2клас 2порядок 5вид(1,2)  
 п) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 6вид(3,6) → 2клас 2порядок 3вид(1,2)  
 р) 1клас(0,7) → 2клас 2порядок 1вид(4,5) → 2клас 2порядок 6вид(3,6) → 2клас 2порядок 1вид(1,2)

Інші види груп Ассура четвертого класу третього порядку можна отримати, якщо в варіантах (рис. 1 – 5) замінити обертальні і поступальні кінематичні пари, відповідно, поступальними і обертальними парами. Для того, щоб визначити послідовність кінематичного дослідження на основі наведених варіантів груп Ассура четвертого класу третього порядку згідно з умовною заміною ведучої ланки будемо вважати, що дійсна ведуча ланка 1 механізму (кривошип) утворює з ланкою 2 групи кінематичну пару  $A_1$ , а дві інші зовнішні кінематичні пари  $A_7$ ,  $A_9$  утворені відповідними ланками 5, 7 групи Ассура та стояком 0.

Результати дослідження для зручності наведені в таблиці. Формули будов механізмів, що є кінематично-еквівалентними механізмам четвертого класу мають варіанти, в яких умовно іншою можливою ведучою ланкою є ланка 7.

Аналіз формул наведених в таблиці дозволяє стверджувати, що будь-який механізм четвертого класу зі ступенем вільності  $W=1$  на основі груп Ассура четвертого класу третього порядку може бути кінематично досліджений в послідовності, яка обумовлена формулою будови умовного кінематично-еквівалентного механізму другого класу.

### Висновки

Зроблено структурне дослідження механізмів 4-го класу на основі можливих видів груп Ассура 4-го класу третього порядку за допомогою умовної зміни ведучої ланки механізму. Отримані результати дозволяють спростити кінематичний аналіз таких механізмів та збільшити точність результатів дослідження.

### Література

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский – М. : Наука, 1988. – 640 с.
2. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин / Баранов Г.Г. – М. : Машиностроение, 1975. – 494 с.
3. Сборник научно-методических статей по теории механизмов и машин. Выпуск 9. – М. : Выssh. shk., 1982. – 160 с.
4. Кошель С. О. Аналіз плоских механізмів з структурними групами 3-го класу / С. О. Кошель, Г. В. Кошель // Вісник КНУТД. – 2012. – № 4. – С. 22–26.

### References

1. Artobolevskiy I.I. Teoriya mehanizmov i mashin. M.: Nauka, 1988 – 640 s.
2. Baranov G.G. Kurs teorii mehanizmov i mashin. M.: Mashinostroenie, 1975 – 494 s.
3. Sbornik nauchno-metodicheskikh statey po teorii mehanizmov i mashin. Vyipusk 9. M.: Vyissh. shk., 1982. – 160 s.
4. Anallz ploskikh mehanizmlv z strukturnimi grupami 3-go klasu / Koshel S. O., Koshel G. V. K.: VIsnik KNUTD. 2012. № 4, s. 22-26.

Рецензія/Peer review : 14.1.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
 Рецензент: д.т.н., професор В.П. Місяць

УДК 62.229.315 (043.2)

Р.Е. КОСТЮНИК

Национальный авиационный университет

## МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

*Показано, что наиболее эффективным способом очистки трущихся поверхностей подшипников качения является комбинированное бесконтактное импульсное электромагнитное и турбулентное воздействие на поверхности и микрочастицы ферромагнитной и другой природ. Физика процесса такой очистки заключается в подавлении коэрцитивных сил взаимодействия поверхностей тел различной массы путем изменения их магнитного состояния соответствующей частотой.*

*Ключевые слова: трущиеся поверхности, подшипник, магнитно-турбулентная очистка, микрочастицы.*

R.E. KOSTYUNIK

National Aviation University

### METHOD OF CONTACTLESS MAGNETIC-TURBULENT CLEANING OF BALL-BEARINGS

*It is shown that the most effective expedient of clearing of rubbing surfaces of bearings is the combined noncontact pulsing electromagnetic and turbulent action on surfaces and microparticles of the ferromagnetic and other nature. The physics of process of such clearing consists in inhibition of coercive forces of interaction of surfaces of bodies of various mass by change of their magnetic state by corresponding frequency.*

*Keywords: rubbing surfaces, the bearing, magnetic-turbulent clearing, microparticles.*

#### Введение

Отличительной особенностью авиационных шарикоподшипников является то, что они в десятки и сотни раз дороже аналогичных с одинаковыми типоразмерами подшипников массового производства и имеют значительно больший ресурс по сравнению с межремонтным ресурсом ГТД и его агрегатов [1, 2, 3]. Поэтому полная замена шарикоподшипников при его ремонте в ходе эксплуатации – одна из весьма существенных статей расходов, которую несут ремонтные предприятия и авиакомпании-перевозчики. Убытки в ходе плановых ремонтов узлов и агрегатов ГТД оцениваются от 10 до 25% стоимости капитального ремонта. Поэтому разработка новых высокоэффективных методов реновации неразборных шарикоподшипников актуальная задача, решение которой позволит существенно уменьшить эксплуатационные расходы на ремонт авиационной техники.

#### Постановка задачи

В производстве и в техобслуживании трибосистемы качения подвергаются очистке. Известны различные методы и технологий удаления загрязнений. С учетом конструктивных и технологических различий, а также особенностей эксплуатации подшипников, наибольшее распространение получили ультразвуковые методы их очистки. При этом для разрыхления и ослабления связей загрязнений с подложкой, и последующего их удаления используют преимущественно гидродинамическое воздействие. Как показали результаты исследований [4, 5], даже такой относительно эффективный метод, как ультразвуковой, не всегда обеспечивает требуемый уровень чистоты рабочих поверхностей неразборных подшипников качения.

Одним из более важных показателей качества шарикоподшипников является общий уровень вибраций (ОВУ) при прочих равных условиях осевого нагружения и частоты вращения. Тщательные исследования показали, что причиной высоких значений общего уровня вибраций шарикоподшипников является наличие на рабочих поверхностях тел и дорожек качения, а также сепаратора значительного количества микро-, субмикро- и наночастиц ферромагнитной природы. Анализ показал, что их присутствие на поверхностях шарикоподшипников, которые в настоящее время поставляются в герметичных упаковках – результат естественного оседания высокодисперсных ферромагнитных частиц, которыми перенасыщена производственная атмосфера подшипниковых предприятий-изготовителей. Ведущие компании мира достигли существенно более высоких показателей не только по качеству изготовления и культуры производства, но и чистоты воздуха в промышленных зонах изготовления деталей и сборки шарикоподшипников различного назначения. Однако проблема загрязнений трактов качения неразборных подшипников по-прежнему остается актуальной и для мировых брендов подшипниковой индустрии.

Согласно современной теории микромагнетизма шарикоподшипниковые стали типа ШХ-15 являются типичным ферромагнетиками. Все ферромагнетики имеют доменную структуру, отражающую магнитные свойства как частиц от нано- и микро- до метрового масштабов. Таким образом, доменную структуру имеют как детали шарикоподшипников, так и микрочастицы, образующиеся в ходе подшипникового производства. Механизм формирования доменных структур в подшипниковых деталях обусловлен совместным действием эффективных полей [6, 7, 8] обмена, анизотропии, Зеемана (внешнее магнитное поле), магнитостатического и упругих напряжений.

#### Результаты исследования

Обширные исследования авиационных шарикоподшипников различных компаний-производителей

позволили констатировать, что как новые, так и шарикоподшипники после длительной эксплуатации на своих поверхностях удерживают значительное количество металлических ферромагнитных и других загрязнений, которые не удаляются ультразвуковым методом.

Разработанный в научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий Национального авиационного университета стенд очистки подшипников качения ОПШ-01М [9–11] позволяет эффективно удалять со всех поверхностей тракта качения микро- и наночастицы ферромагнитной и другой природы путем комбинированного воздействия импульсными магнитными полями и турбулентными течениями жидкости (рис.1).

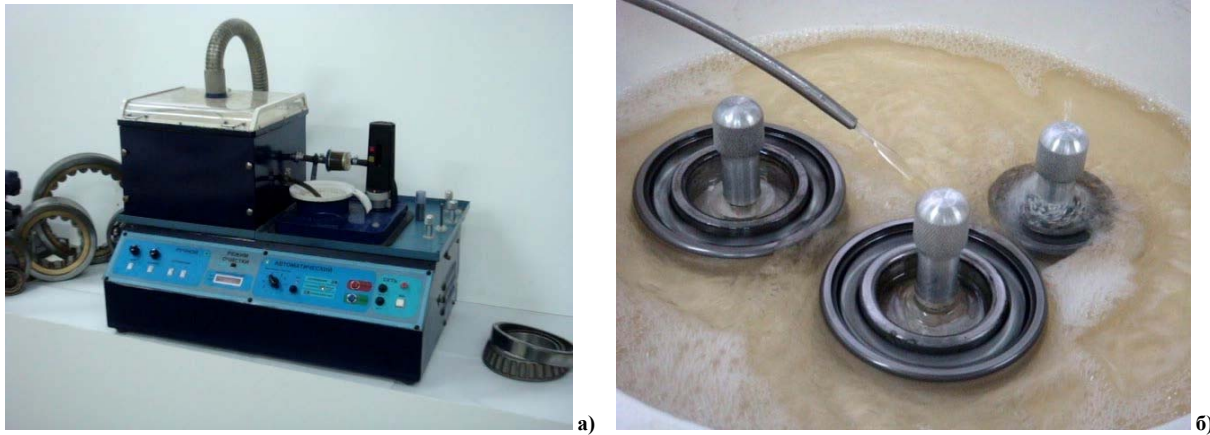


Рис. 1. Внешний вид стенда очистки шарикоподшипников ОПШ-01 (а) и камера очистки трех подшипников с разными типоразмерами (б)

Стенд ОПШ-01М, модернизированный новой программой управления (частота импульсно-магнитного поля, длительность однонаправленных циклов очистки, реверсивность, ускорение), позволяет усовершенствовать предложенные и разрабатывать новые методики очистки шарикоподшипников в сборе. Рекомендуется стенд внедрять не только на этапе реновации подшипников в ходе ремонта ГТД, но и в качестве предэксплуатационной очистки новых подшипников.

Обеспечение высокой чистоты всех поверхностей деталей ГТД, особенно шарикоподшипниковых при сборке новых ГТД, является актуальной проблемой в серийном производстве. Эта проблема решается следующим образом. Новые заводские шарикоподшипники с консервационным маслом или смазкой, в герметичной упаковке, расконсервируются, промываются и подвергаются ультразвуковой промывке. После этого подшипники устанавливаются в камеру очистки стенда ОПШ-01 и подвергаются воздействию на их поверхности комбинированными импульсными магнитно-турбулентными полями в среде авиационного керосина ТС-1. Через несколько минут такой процедуры на дне камеры визуально наблюдается скопление микроскопических металлических частиц, которые легко удаляются с помощью постоянного магнита (рис. 2).

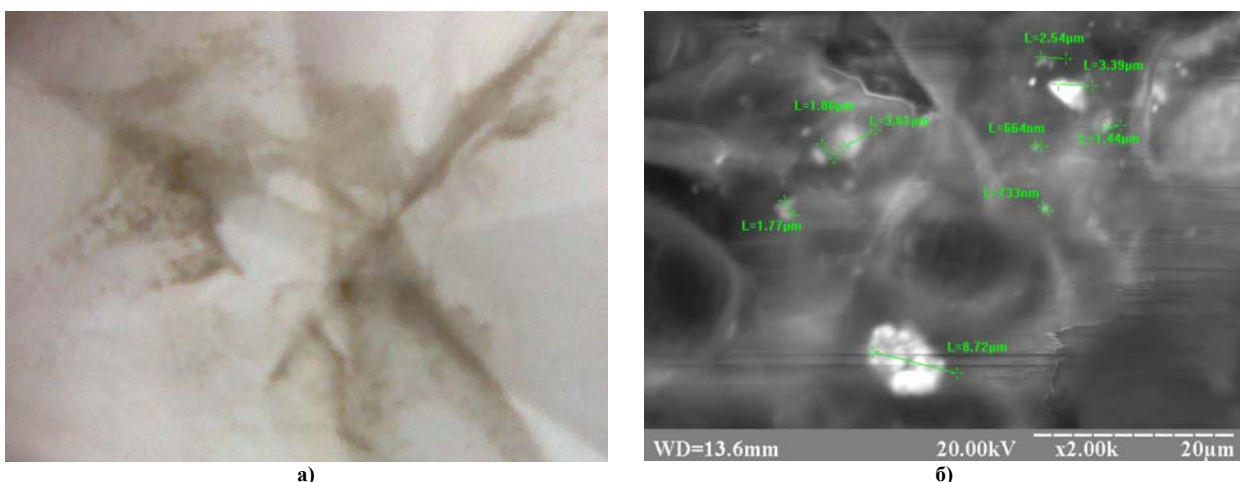


Рис. 2. Внешний вид фильтра с ферромагнитными частицами, удаленными из новых шарикоподшипников после очистки на ОПШ-01 в течении 4 минут каждый (а), и результаты измерений размеров частиц на электронном микроскопе РЭМ-106И (б)

Такие же исследования проводились на подшипниках как отечественного, так и зарубежного производства. Всегда наблюдалось удаление из тракта качения подшипников достаточно большое количество ферромагнитных загрязнений. Ясно, что эти частицы при эксплуатации ГТД с первых секунд начнут играть свою неблагоприятную роль. Поэтому предэксплуатационную очистку шарикоподшипников следует проводить на серийных заводах-изготовителях ГТД, что существенно, по мнению авторов повлияет

на функциональные качества ГТД и внесет свой положительный эффект в безопасность полетов.

С целью повышения эффективности существующих и разработки новых методов и технологий очистки узлов машин и механизмов был проведен ряд исследований, направленных на создание физико-математической модели поведения частиц загрязнений и изучения влияния сил, воздействующих в процессе очистки на компоненты загрязнений рабочих поверхностей подшипника. На рис 2 представлены фотографии внешнего вида фильтра с ферромагнитными частицами, удаленными из новых шарикоподшипников (предварительно распакованных из гермоупаковки и расконсервированных ультразвуковым методом) после очистки на ОПШ-01 в течении 4 минут каждый (а) и результаты измерений размеров частиц на электронном микроскопе РЭМ-106И (б). Распределение количества частиц размерами от 1 мкм до 720 мкм по фракционному составу описывается экспоненциальной функцией: с уменьшением размера количество частиц экспоненциально возрастает.

В качестве объекта исследования был выбран шарикоподшипник серии 203. В качестве моющей среды преимущественно используются углеводородные жидкости и поверхностно-активные вещества, например керосин, относящийся к низкомолекулярным углеводородным соединениям. Режим потока моющей жидкости, проходящей через подшипник, поддерживался турбулентным, как наиболее распространенный в известных методах и способах, что позволяет эффективно реструктурировать загрязнения и удерживать их в потоке моющей среды. С учетом этих условий, следует обратить внимание на то, что при очистке известными методами на частицу, находящуюся на поверхности тракта качения подшипника, действуют следующие силы (рис. 3): гравитационная составляющая  $F_g$ , кулоновские силы  $FG$  сила Архимеда  $F_{arb}$ , сила гидродинамического сопротивления  $F_{gidro}$ , сила адгезии  $F_{adg}$ , магнитная составляющая доменов  $F_m$  [12].

Количественная оценка этих сил при среднем значении параметров частиц и внешних воздействие позволяет выделить две значимые силы: сила гидродинамического сопротивления и сила магнитного взаимодействия.

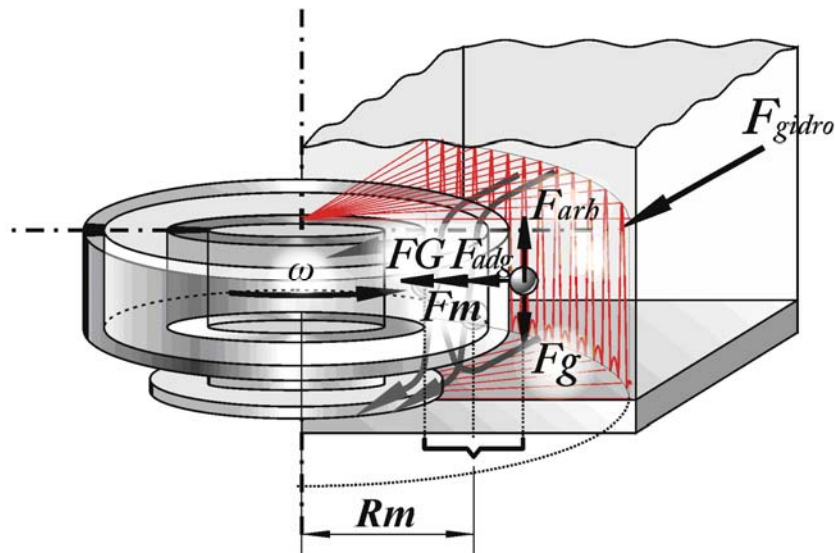


Рис. 3. Силы, действующие на частицу при очистке подшипника

Исходя из вышеизложенного, наибольшей силой, воздействующей на загрязнения в процессе очистки поверхности, является гидродинамическая сила. Согласно формуле Н.Е. Жуковского [12] сила лобового сопротивления частицы сферической формы в потоке моющей среды составляет

$$F_x = 0,2 \cdot \pi \cdot d_q^2 \cdot \rho \cdot \Delta u^2, \quad (1)$$

где  $d_q$  – диаметр частицы, м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta u$  – скорость потока жидкости относительно частицы, м/с.

В случае использования в качестве моющей среды керосина при скорости потока  $\Delta u = 1,2$  м/с, достаточной для образования турбулентного характера течения в каналах подшипника качения, сила лобового сопротивления рассматриваемой частицы составит от  $7,24 \cdot 10^{-12}$  до  $7,24 \cdot 10^{-8}$  Н.

Необходимо также учитывать, что с уменьшением размера фракций загрязнения требуется увеличение минимально достаточной для отрыва средней скорости потока. Экспериментальное и теоретическое исследования подтверждают уменьшение скорости движения моющей жидкости в приграничных слоях а также то, что значительное количество особо мелких частиц затенено неровностями поверхности. Существенно, что шероховатость может служить и турбулизатором потока. Наличие в таком течении поперечных пульсаций скоростей жидкости (в поперечном сечении) способствует переносу твердых частиц в массу моющей среды и поддержанию их во взвешенном состоянии. [11].

Анализ литературных источников, а также результаты проведенных авторами экспериментов показали, что на границах доменов конструкционных материалов имеют место достаточно сильные

магнитные поля, что вместе с остаточной намагниченностью деталей в значительной степени препятствует [9] отрыву и удалению с из рабочих поверхностей частиц загрязнений ферромагнитной природы.

С учетом этого рассматриваемую систему можно представить совокупностей пар диполей (рис. 4.).

Для частицы  $m_1$  загрязнения, на поверхности которого магнитная индукция  $B$  составляет 10 мТл (при допущении идентичности материала загрязнения и деталей подшипника), напряженность магнитного поля примет вид:

$$H = \frac{B}{(\mu_0 \mu_m)} = 1,45(A/m) \tag{2}$$

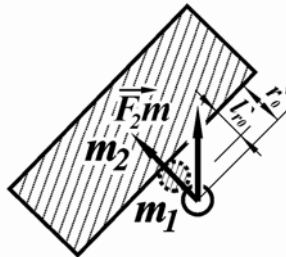


Рис. 4. Магнитное взаимодействие частицы загрязнения ферромагнитной природы с обоймой подшипника

Тогда намагниченность будет соответствовать

$$M_m = \frac{B}{\mu_0} - H = 7956,3(A/m) \tag{3}$$

Для рассматриваемой частицы с объемом  $V_{m1}$  в диапазоне от  $5,24 \cdot 10^{-22}$  до  $5,24 \cdot 10^{-16}$  м<sup>3</sup> и объема обоймы подшипника  $V_{m2} - 4,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> момент диполя равен

$$P = M_m \cdot V = ql \tag{4}$$

Магнитная сила взаимодействия частицы в поле внутреннего кольца подшипника составит

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 H}{4\pi} \tag{5}$$

и для рассматриваемого случая будет принимать значения от  $2,9 \cdot 10^{-14}$  до  $2,9 \cdot 10^{-7}$  Н.

### Выводы

1. Традиционными гидравлическими и ультразвуковым методами реализовать отрыв частиц загрязнений с деталей неразборных шарикоподшипников, а также вынос их и удержание во взвеси моющего раствора крайне затруднено. Это объясняется наличием узких зазоров между трущимися поверхностями тел качения с сепаратором и беговыми дорожками, затененных от прямого внешнего воздействия на них ультразвуковым или гидравлическим полем.

2. Причиной снижения эффективности очистки известными методами есть сложный профиль полостей трибосистем качения, затрудняющий удаление частиц микро-, субмикро- и наноуровня, а также недостаточная изученность электромагнитного их взаимодействия с ферромагнитными деталями подшипников на границах высокоградиентных магнитных доменных структур тел качения, сепараторов и колец.

3. Численное оценочное сопоставление сил удержания частиц загрязнений на поверхностях трибосистем качения подтвердило необходимость особого рассмотрения магнитного взаимодействия исследуемых ферромагнитных объектов на доменном уровне.

4. Очистка шарикоподшипников на стенде ОПШ-01М показала высокую эффективность данного метода, как для новых подшипников качения, так и для бывших в эксплуатации.

### Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков / Вонсовский С.В. – М. : Наука, 1971. – 805 с.
2. Кандаурова Г.С. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры / Кандаурова Г.С., Оноприенко Л.Г. – Свердловск, 1977.
3. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их применения / Тикадзуми С. – М. : Мир, 1987. – 420 с.
4. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения. Справочник / Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. – М. : Машиностроение, 1975. – 575 с.
5. Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов / Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 335 с.

6. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
7. Оптимизация профилей рабочих поверхностей цилиндрических роликоподшипников при перекосах колец : Отчет по НИР / руководитель темы Жильников Е.П. / Завод авиационных подшипников. – Самара, 2008. – 32 с.
8. Черменский О.Н. Подшипники качения : справочник-каталог / О.Н. Черменский, Н.Н. Федотов. – М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.
9. Аксьонов О. Ф. В. Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень / О. Ф. Аксьонов, О.У. Стельмах, Р. Є. Костюнік, О. В. Кушев // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.
10. Аксьонов О.Ф. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення / О. Ф. Аксьонов, Р. Є. Костюнік, О. В. Кушев // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2008. – Вип.49. – Т. 1. – С. 9 – 13.
11. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости / Аксенов А.Ф. – М. : Транспорт., 1965. – 171 с.
12. Белянин П.Н. Промышленная чистота машин / Белянин П.Н., Данилов В.М. – М. : Машиностроение, 1982. – 224 с.

#### References

1. Magnetizm. Magnitnye svoystva dia-, para-, ferro-, antiferro-, i ferromagnetikov / Vonsovskij S.V. – Moskva: Nauka, 1971. - 805 s.
2. Kandaurova G.S. Osnovnye voprosy teorii magnitnoj domennoj struktury / Kandaurova G.S., Onoprienko L.G. - Sverdlovsk, 1977.
3. Tikadzumi S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye karakteristiki i ih primeneniya / Tikadzumi S. – Moskva: Mir, 1987. - 420 s.
4. Bejzel'man R.D. Podshipniki kachenija. Spravochnik / Bejzel'man R.D., Cypkin B.V., Pere'l L.Ja. - M.: Mashinostroenie, 1975. - 575s.
5. Belousov A.I. Teorija i proektirovanie gidrodinamicheskikh dempferov opor rotorov / Belousov A.I., Baljakin V.B., Novikov D.K. - Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2002. — 335 s.
6. Birger I.A. Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik / Birger I.A. , Shorr B.F., Iosilevich G.B. - M.: Mashinostroenie, 1979. — 702 s.
7. Optimizacija profilej rabochih poverhnostej cilindricheskikh rolikopodshipnikov pri perekosah kolec: Otchet po NIR / Zavod aviacionnyh podshipnikov. Rukovoditel' temy Zhil'nikov E.P. - Samara, 2008. - 32 s.
8. Chermenskij O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kachenija: Spravochnik katalog / Chermenskij O.N., Fedotov N.N. - M.: Mashinostroenie, 2003. — 576 s.
9. Aks'onov O. F. V. Elektromagnitna skladova utvorennya feromagnitnih zabrudnen' / Aks'onov O. F., Stel'mah O.U., Kostjunik R. C., Kushhev O. V. // Problemi tertja ta znoshuvannja. – K.: NAU, 2006. – Vip.46. – С. 91 – 102.
10. Aks'onov O.F. Pidvishhennja funkcional'noi jakosti pidshipnikiv kochennja shljahom elektromagnitnogo ochishhennja / Aks'onov O. F., Kostjunik R. C., Kushhev O. V. //Problemi tertja ta znoshuvannja – K.: NAU, 2008. – Vip.49. – Т. 1. S.9 – 13.
11. Aksenov A.F. Aviacionnye topliva, smazochnye materialy i special'nye zhidkosti.– M.: Transport., 1965. – 171 s.
12. Beljanin P.N. Promyshlennaja chistota mashin / Beljanin P.N., Danilov V.M. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 224 s.

Рецензія/Peer review : 7.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Бойченко С.В.



**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВТРАТ З БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ  
В ХОДІ РОЗМІЩЕННЯ ЇЇ В ГРУНТІ**

В роботі обґрунтовано ефективність розміщення біогазової установки в ґрунт для зменшення впливу коливань температур навколишнього середовища на стабільність теплового режиму процесу бродіння органічної маси. Промодельовано величини тепловтрат з біогазових установок із мінімальним та сучасним ефективним утепленням. Встановлено, що в результаті розміщення біогазової установки в ґрунті можна зменшити тепловтрати в навколишнє середовище на 26%.

Ключові слова: тепловтрати, біогазова установка, утеплення.

G.S. RATUSHNJAK, K.V. ANOKHINA  
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

**MODELING WITH HEAT LOSS BIOGAS PLANT PLACED ON A SOIL**

Abstract - The work proved efficiency of biogas plant in the soil to reduce the effects of fluctuations in ambient temperature on the stability of heat-term treatment fermentation of organic matter. Simulated values of heat from bio-gas plants with a minimum of modern and efficient insulation. It was established as a result of placing a biogas plant in the soil can reduce heat loss to the environment by 26%.

Keywords: heat, biogas plant, insulation.

**Вступ**

Екологізація господарської діяльності потребує структурно-технологічної перебудови управління енергетичним комплексом на базі трансферу інноваційних енергоощадних екологічно безпечних технологій [1]. Біоконверсія є технологічним процесом, який передбачає перероблення органічної маси з метою отримання теплоти або палива високої якості, а також екологічно чистих органічних добрив [2]. Ефективність перероблення біомаси в енергетичну продукцію досягається лише за раціональних параметрів технологічних процесів і машин для переробних підприємств, що здійснюють конверсію біосировини, основним з яких є підтримання температурного режиму процесу бродіння, що супроводжується виділенням тепловтрат у навколишнє середовище. Термостабілізація та інтенсифікація процесу анаеробного бродіння субстрату при його перемішуванні можуть бути забезпечені шляхом зниження тепловтрат через огорожувальні конструкції біореактора. При виробництві біогазу шляхом анаеробного бродіння органіки метаболічна активність і репродуктивна здатність мікроорганізмів знаходяться в функціональній залежності від температури в біореакторі. Температура впливає на об'єм газу, який можна отримати із певної кількості органічної речовини протягом заданого часу в реакторі, а також на технологічний час процесу зброджування, необхідний для вивільнення певної кількості газу при відповідній температурі [1–4].

**Постановка задачі дослідження**

Для досягнення високої ефективності роботи біореакторів та отримання максимальної кількості біогазу із одиниці об'єму біомаси необхідно створити оптимальні технологічні параметри в біореакторі [1].

Важливим аспектом стабільності теплового режиму в біореакторі є підігрівання субстрату та одночасна теплоізоляція стінок біореактора для зменшення впливу коливань температур навколишнього середовища.

Використання сучасних теплоізоляційних матеріалів підвищує ефективність та економічність процесу нагрівання субстрату в біогазовій установці. Одним з ефективних рішень для зменшення впливу коливань температур навколишнього

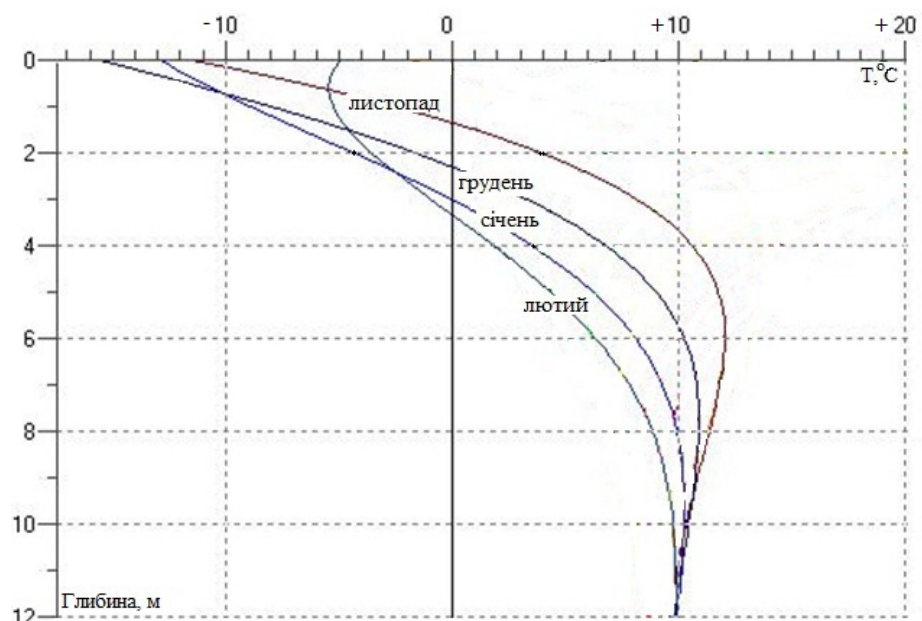


Рис. 1. Графік зміни температури в шарах ґрунту залежно від сезонного значення температури на поверхні землі [5]



середовища на стабільність теплового режиму процесу бродіння є розміщення біогазової установки в ґрунт. Температура ґрунту, як правило, вища за температуру навколишнього середовища. Наприклад, в м. Вінниця при температурі навколишнього повітря в період найбільш холодної п'ятиденки  $-21^{\circ}\text{C}$  температура верхніх шарів ґрунту сягає  $0\dots+5^{\circ}\text{C}$ . Розподіл температур в шарах ґрунту залежно від сезонного значення температури на поверхні землі наведено на рис. 1.

Отже, при розміщенні біогазової установки в ґрунті зменшується вплив коливань температур навколишнього середовища на стабільність теплового режиму бродіння органічної маси; збільшується економічна доцільність за рахунок зменшення витрат енергетичних ресурсів на підігрівання органічної маси в біогазовій установці, а тому моделювання тепловтрат з біогазової установки при розміщенні її в ґрунті є актуальним.

### Основна частина

Величина теплової енергії, що надходить до заглибленого в ґрунт корпусу біореактора, характеризується не стаціонарністю процесу [6]. Кількість теплової енергії визначається такими основними чинниками як теплопровідність ґрунту та зміною його температури протягом року в часі та по висоті шару ґрунту.

$$Q_{GP}^i = f(\lambda_{GP}^i, \Delta T_{GP}^i), \quad (1)$$

де  $\lambda_{GP}^i$  – теплопровідність  $i$ -го шару ґрунту;

$\Delta T_{GP}^i$  – зміна температури  $i$ -го шару ґрунту в розрахунковий період року.

Теплопровідність ґрунту визначається його фізико-механічними властивостями, основними з яких є густина ( $\rho_{GP}^i$ ) та вологість ( $\beta_{GP}^i$ )

$$\lambda_{GP}^i = f(\beta_{GP}^i, \rho_{GP}^i). \quad (2)$$

Характер розподілу температури ґрунту в різні періоди року та за глибиною від його денної поверхні також неоднорідні, а тому при визначенні тепловтрат від корпусу біореактора в зовнішнє середовище доцільно враховувати середні вагові значення теплопровідності ґрунту

$$\lambda_{GP} = \frac{\lambda_{GP}^i \cdot h_i}{\sum h_i}, \quad (3)$$

де  $h_i$  – товщина  $i$ -го шару ґрунту.

Величина тепловтрат із внутрішнього середовища біореактора  $Q_B$  (Вт), що характеризується термічним опором матеріалу огорожувальних конструкцій, різницею температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем реактора, обчислюється за формулою:

$$Q_B = \alpha_T (T_B - T_3) n_1 F_B \eta_n, \quad (1)$$

де  $\alpha_T = \frac{1}{R}$  – коефіцієнт теплопередачі огороження реактора, Вт/( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ );

$R$  – термічний опір теплопередачі матеріалу огорожувальної конструкції, ( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )/Вт;

$(T_B - T_3)$  – розрахункова різниця температур між внутрішньою та зовнішньою температурами,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$n_1$  – поправковий множник, що враховує зменшення розрахункової різниці температур для огорожень біореактора (для даного випадку  $n = 1$ );

$F_B$  – площа поверхні огороження біореактора,  $\text{m}^2$  (ведеться розрахунок для  $F_B = 1 \text{m}^2$ );

$\eta_n$  – коефіцієнт, що враховує додаткові тепловтрати, які можуть помітно змінюватись від впливу сонячного випромінювання, інфільтрації та ексфільтрації,  $\eta_n = 1$ .

Таким чином, з врахуванням наведених припущень щодо роботи біореактора, формула (1) матиме вигляд

$$Q_B = \frac{T_B - T_3}{R}. \quad (2)$$

Для виконання моделювання тепловтрат з біогазової установки розглянуто конструкції із мінімальним утепленням з термічним опором  $R=1$  ( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )/Вт та біогазові установки із сучасним ефективним утепленням та  $R=4$  ( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )/Вт. Внутрішня температура середовища органічної маси залежить від режиму ферментації: термофільний ( $55\dots45^{\circ}\text{C}$ ), мезофільний ( $25\dots45^{\circ}\text{C}$ ) та криофільний ( $5\dots20^{\circ}\text{C}$ ). Для порівняння наведені біогазові установки розміщено в просторі навколишнього середовища, заглибленими наполовину на рівень промерзання ґрунту та повністю влаштовані в ґрунті. Запропоновані схеми наведено на рис. 2.

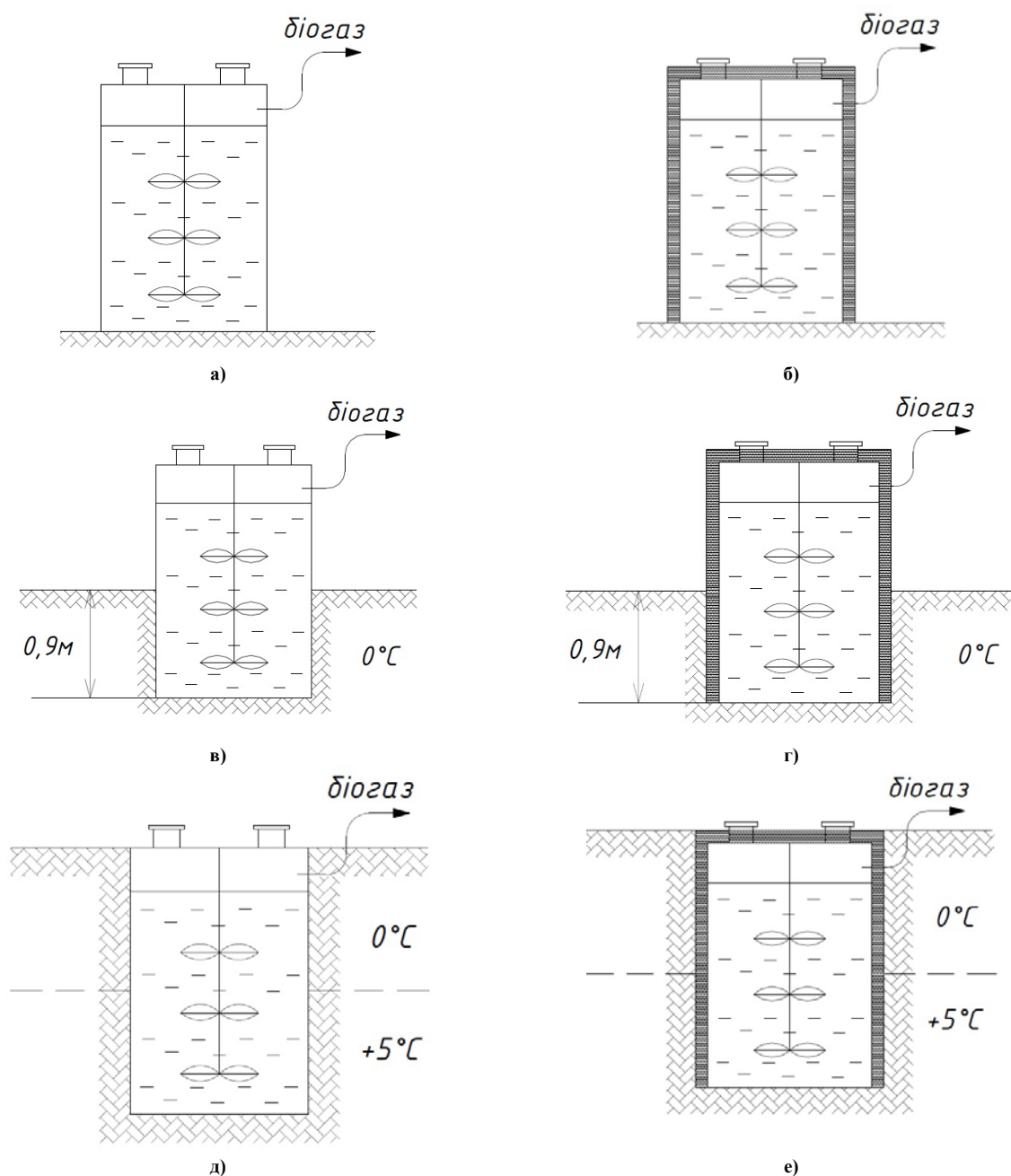


Рис. 2. Схеми розміщення біогазових установок: а), в), д) – біогазові установки із мінімальним утепленням з термічним опором  $R = 1 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  та розміщенням в просторі навколишнього середовища, заглибленими наполовину на рівень промерзання ґрунту та повністю влаштувані в ґрунті відповідно; б), г), е) – біогазові установки із сучасним ефективним утепленням та  $R = 4 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  та розміщенням в просторі навколишнього середовища, заглибленими наполовину на рівень промерзання ґрунту та повністю влаштувані в ґрунті

Отримані за результатами моделювання тепловтрати для різних схем розміщення біогазових установок (рис. 2) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Тепловтрати з біогазових установок різного утеплення залежно від розміщення**

Розміщення біогазової установки	Утеплення ізоляційними матеріалами					
	Мінімальне, $R = 1 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$			Ефективне, $R = 4 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$		
	термофільний	мезофільний	кріофільний	термофільний	мезофільний	кріофільний
в просторі навколишнього середовища	71	61	41	17,8	15,3	11,9
заглиблення на рівень промерзання ґрунту	60,5	50,5	30,5	15,1	12,6	7,6
влаштування в ґрунті	47,5	37,5	17,5	11,9	9,4	4,4

Для різних теплових режимів анаеробного бродіння проведено числові експерименти із визначення тепловтрат через огорожувальні конструкції при різному розміщенні біогазових установок за формулою (2). Графічно значення тепловтрат при різному розміщенні та із різним утепленням біогазових установок в криофільному, мезофільному та термофільному режимах зброджування зображено на рис. 3–5.

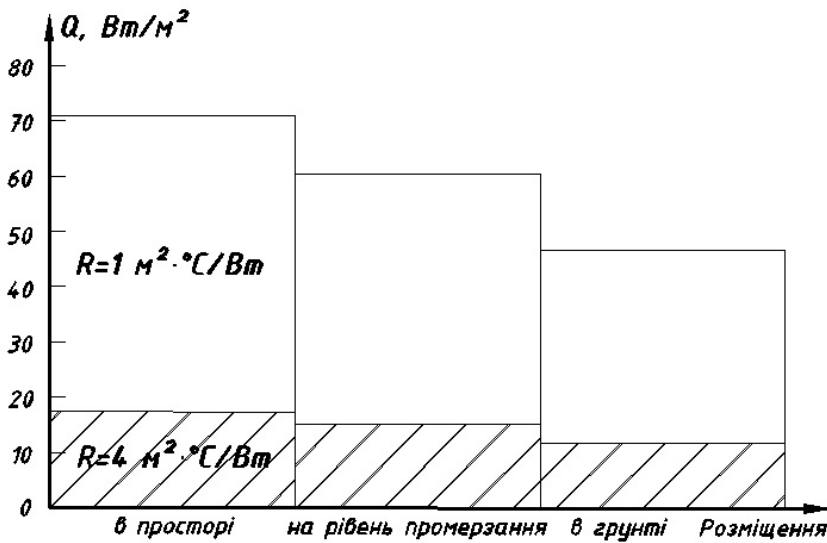


Рис. 3. Тепловтрати з біогазової установки в термофільному режимі бродіння ( $T_b=50\text{ }^\circ\text{C}$ )

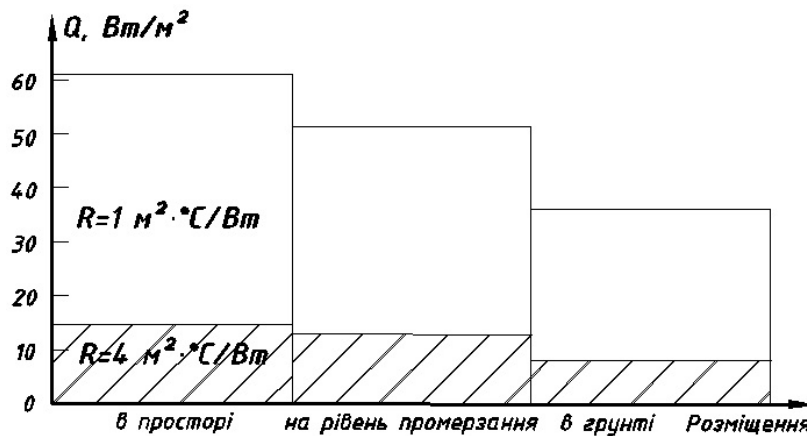


Рис. 4. Тепловтрати з біогазової установки в мезофільному режимі бродіння ( $T_b=40\text{ }^\circ\text{C}$ )

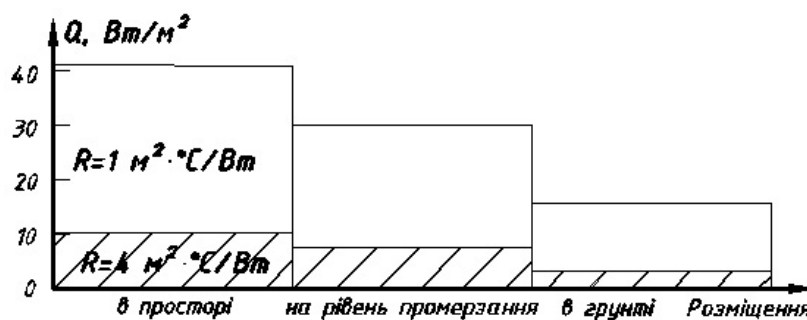


Рис. 5. Тепловтрати з біогазової установки в криофільному режимі бродіння ( $T_b=20\text{ }^\circ\text{C}$ )

Порівняльний аналіз тепловтрат з біогазових установок при різних режимах бродіння (рис. 3–5) та схемах їх розміщення в ґрунті свідчить про різну ефективність термостабілізації бродіння органічної маси. В результаті застосування ефективного утеплювача можна досягти зниження тепловтрат в 4 рази, а розміщуючи біогазові установку в ґрунті зменшити тепловтрати в навколишнє середовище на 26 %.

#### Висновки

В статті запропоновано декілька варіацій розміщення біогазової установки для зменшення тепловтрат та підвищення термостабілізації процесу бродіння органічної маси. В результаті числового моделювання із визначення тепловтрат в разі різного розміщення та з різним утепленням біогазових установок в криофільному, мезофільному та термофільному режимах зброджування встановлено, що під час розміщення біогазової установки в ґрунті тепловтрати в навколишнє середовище зменшуються на 26 %.

**Література**

1. Ратушняк Г.С. Энергоэффективные технологические процессы та обладнання біоконверсії : монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.
2. Ратушняк Г. С. Энергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання : навч. пос. / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.
3. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
4. Ратушняк Г. С. Багатошарові захисні конструкції від тепловтрат з герметичним повітряним прошарком / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 1. – С. 38–42.
5. Кідрук М. І. Моделювання та оптимізація систем тепlopостачання будівель з використанням відновних джерел енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://progress21.com.ua/ua/articles/groundcollector>.
6. Костиков А. О. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником / А. О. Костиков, Д. Х. Харлампиди // Энергетика: економіка, технології, екологія. 2009. – № 1. – С. 32–40.

**References**

1. Ratushniak G. S. Energy efficient processes and equipment bioconversion: monograph / G. S. Ratushnyak, K. V. Anokhina. - Vinnitsa: VNTU, 2013. 160 p.
2. Ratushniak G. S. Energy renewable heat: teach. Ref. / G. S. Ratushnyak, V. V. Dzhedzhula, K. V. Anokhina. - Vinnitsa: VNTU, 2010. - 170 p.
3. Tkachenko S. Heat and hydrodynamic processes in cell energy biogas plant / S. Y. Tkachenko, D. V. Stepanov. Vinnitsa: VNTU, 2004. - 132 p.
4. Ratushniak G. S. Multilayer protective design of heat with a sealed air-proshar com / G. S. Ratushnyak, K. V. Anokhina // Bulletin of Khmelnytsky National University. 2009. № 1. P. 38-42.
5. Kidruk M. I. Modeling and optimization of heating buildings using Restore-energy sources. URL: <http://progress21.com.ua/ua/articles/groundcollector>.
6. Kostykov A. Effect of heat on soil Efficiency heat pump installation with heat exchanger / A. A. Kostykov, D. H. Harlampydy // Power: economics, technology, ecology. 2009. № 1. P. 32-40.

Рецензія/Peer review : 13.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: к.т.н., доцент Джеджула В. В.

УДК 681.518:616-71

В.М. ЛИСОГОР

Вінницький національний аграрний університет

А.В. СНИГУР, Д.В. АНТОНЮК

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ШВИДКОДІЇ ІВС ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ СТИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ

*В статті проведений аналіз методів підвищення точності та швидкодії ІВС для опрацювання стрибкоподібних сигналів. На основі проведеного аналізу сформовані рекомендації щодо побудови вимірювального каналу ІВС.*

*Ключові слова: біологічно-активна точка, статичні похибки, інформаційно-вимірювальна система, сигнали.*

V. M. LISOGOR

Vinnytsia National Agrarian University

A. V. SNIGUR, D.V. ANTONIUK

Vinnytsia National Technical University

## METHODS OF INCREASE OF EXACTNESS AND FAST-ACTING OF IMS ARE FOR WORKING OF SALTATORY SIGNALS

*Abstract - In the article the analysis of methods of increase of exactness and fast-acting of IMS is conducted for working of saltatory signals. On the basis of the conducted analysis the formed recommendations are in relation to the construction of measuring channel of IMS.*

*Keywords: biologically-active point, static errors, informatively-measuring system, signals.*

### Вступ

При побудові систем, наприклад [1–4], для опрацювання стрибкоподібних сигналів у акустичних вимірюваннях, сейсмозвідці та при дослідженні стану здоров'я людини за допомогою біологічно-активних точок, недостатньо досліджуються можливі шляхи покращення їх характеристик, а саме точності, швидкодії з метою зменшення загальної похибки вимірювання. При цьому поряд із зазначеним, виникає питання компенсації динамічних похибок другого роду при вимірюванні, стабільності метрологічних характеристик систем, їх метрологічної надійності для можливості функціонування апаратури за польових умов. У відповідних системах дослідження наприклад точок акупунктури (ТА) відсутня гальванічна розв'язка, це може призвести до протікання струму на вхід ІВС та давачі. Відносна невелика увага приділяється обґрунтуванню структурної організації вимірювального каналу (ВК) при цьому не враховується ряд реальних особливостей сигналів (наприклад наявність у них “піків”, швидкість).

**Метою публікації** є аналіз методів підвищення точності і швидкодії ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів для формування рекомендацій щодо покращення її метрологічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: проаналізувати способи покращення характеристик складових елементів ВК ІВС, проаналізувати методи підвищення точності та швидкодії ІВС; сформулювати рекомендації щодо підвищення загальної точності та швидкодії вимірювання.

### Основний результат дослідження

Підвищення точності і швидкодії ІВС для опрацювання стрибкоподібних сигналів розглядається розробниками в основному як покращення відповідних характеристик їх окремих структурних елементів, що входять до складу аналогової частини. Так, наприклад, покращення точності, а саме коригування характеристики підсилювачів у складі ВК системи (рис. 1) може виконуватись за таким методом [1].

На першому етапі після запуску, ОКБ видає сигнал, що комутує вихід ЦАП на вхід квантувача через АК2. На вході ЦАП послідовно формуються коди  $K_1, K_2, \dots, K_N$ , після квантування отримуються масиви значень  $\{K_i\}$ . Далі вихід резистивного дільника комутується АК1 на вхід П, а вихід П за допомогою АК2 – на вхід квантувача. Блок ОКБ послідовно видає коди  $K_1, K_2, \dots, K_N$  на вхід ЦАП. Відповідні ним значення вихідного сигналу  $A_1, A_2, \dots, A_N$  надходять через дільник й АК2 на вхід П:  $A'_i = A_i \cdot K_{он}$ , де  $K_{он}$  – коефіцієнт поділу дільника, при цьому  $K_{он} \approx 1/K_{нс}$ ,  $K_{нс}$  – коефіцієнт підсилення. Сигнал з виходу П надходить на вхід квантувача АЦП, отримується код  $K'_i$ . У результаті у блоці оперативної пам'яті ОКБ формується масив вихідних значень  $\{K'_i\}$  статичної передатної характеристики П. У ОКБ обчислюються коефіцієнти чутливості для  $i$ -го інтервалу характеристики

$$S'_i = (K'_{i+1} - K'_i) / (K_{i+1} - K_i)$$

та зворотної перетворювальної характеристики  $S_i = 1/S'_i$ .

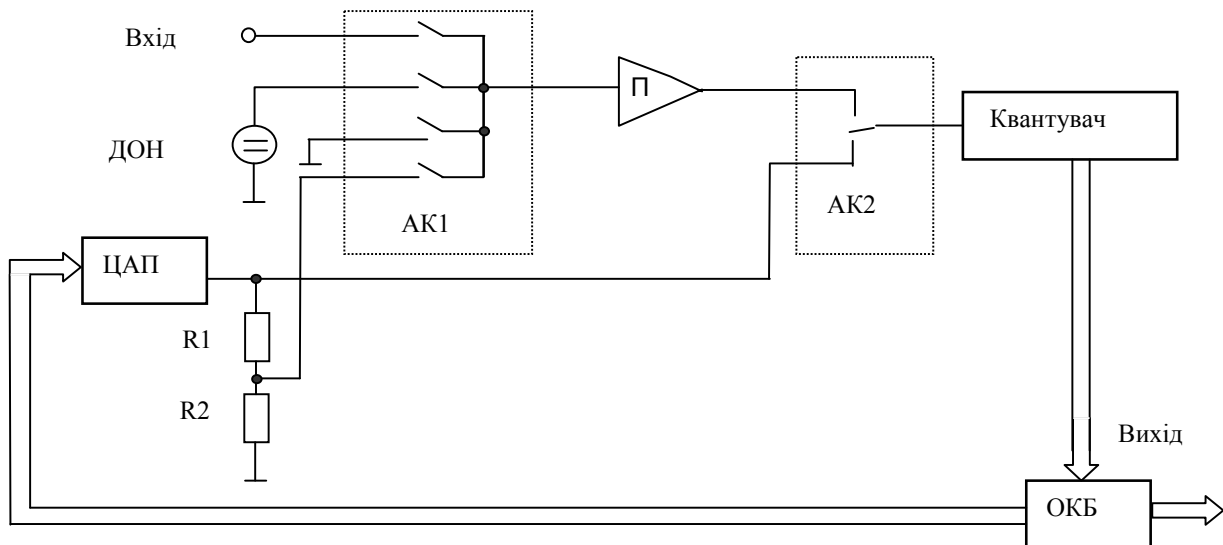


Рис. 1. Коригування характеристики підсилювача у складі ІВС

Тут П – підсилювач; АК – аналоговий комутатор; ОКБ – обчислювально-керуючий блок; R1, R1 – резистори дільника напруги; ДОН – джерело опорної напруги

Зсув нульового рівня на  $i$ -му інтервалі лінії прямої передатної, характеристики П отримується як  $\Delta'_i = K'_{i+1} - K_{i+1} \cdot S'_i$ , а зворотної –  $\Delta_i = -\Delta'_i / S'_i$ . Отже, на першому етапі у блоку оперативної пам'яті ОКБ є сформовані таблиці коефіцієнтів  $\{\Delta_i\}$  та  $\{S'_i\}$ .

На другому етапі на вхід П через АК1 підключається “0” і квантувач формує код  $K_{zero}$ . Блок ОКБ визначає приналежність  $K_{zero}$  одному із інтервалів характеристики, що визначається  $K_1, K_2, \dots, K_N$ . З таблиці коефіцієнтів, сформованої на першому етапі залучаються значення зворотної перетворювальної характеристики  $\Delta_k$  та  $S_k$ . Скоригований код отримується за формулою:  $K_{zero} = K'_{zero} \cdot S_k + \Delta_k$ . Аналогічним чином кодується напруга ДОН і з отриманого значення усувається похибка лінійності; результат отримується у вигляді.

$$K_{дон} = K'_{дон} - K_{zero}$$

Отримане значення відрізняється від коду  $K_{окк}$ , що відповідає напрузі з ДОН, яке вимірюється на етапі виготовлення і заноситься до постійної пам'яті ОКБ. В такому випадку масштабний коефіцієнт розраховується у вигляді  $K_m = K_{окк} / K_{дон}$ , а значення  $\{\Delta_i\}$  та  $\{S'_i\}$  множаться на нього.

Кінцевий результат при підсиленні вхідного аналогового сигналу отримується у вигляді

$$K_{вих} = K'_{вих} \cdot S_k + \Delta_k - K_{zero} \quad \text{або} \quad K_{вих} = K_{ex} \cdot S'_k + \Delta'_k,$$

а для відповідної напруги

$$U_{вих} = \Delta'_k + U_{ex} \cdot S'_k.$$

Щодо характеристик фільтрів у складі ВК [50], то специфіка їх застосування пов'язана із наявністю у каналі АЦП. В даному випадку є необхідність використання інтегральної оцінки похибки амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра (при його виборі) у смузі пропускання з урахуванням модуля спектральної щільності вхідного сигналу

$$\Delta_{АЧХ} = \frac{1}{(\omega_g - \omega_n) \cdot E(\omega_n)} \int_{\omega_n}^{\omega_g} E(\omega) \cdot \left| 1 - \frac{A(\omega)}{A(\omega_0)} \right| d\omega$$

або

$$\Delta_{АЧХ} = \max |A(\omega) / A(\omega_0)|,$$

при цьому у випадку вибору фільтру

$$\Delta_{АЧХ} \leq \Delta_{АЦП},$$

де  $E(\omega_n)$  – спектральна щільність вхідного сигналу,  $A(\omega) = (\text{Re}(K(j\omega)))^2 + (\text{Im}(K(j\omega)))^2$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_g$  – верхня та нижня частоти у спектрі вхідного сигналу,  $\Delta_{АЦП} = 1/2^n$ ,  $n$  – розрядність АЦП.

При виборі фільтрів у складі системи також використовуються відношення для інтегральної оцінки нелінійності фазо-частотної характеристики (ФЧХ)

$$\Delta_{\phi_{\text{ЧХ}}} = \frac{1}{(\omega_g - \omega_n) \cdot E(\omega_n)} \int_{\omega_n}^{\omega_g} E(\omega) \cdot |\varphi(\omega) - \varphi_n(\omega)| d\omega,$$

де  $\varphi(\omega)$  може бути представлена у вигляді багаточлена

$$\varphi(\omega) = b_0 + b_1 \cdot \omega + \sum_{i=2}^{\infty} b_i \cdot \omega^i,$$

а лінійна частина  $\varphi_n(\omega)$  дорівнює  $\varphi_n(\omega) = b_0 + b_1 \cdot \omega$ .

Стосовно покращення характеристик АЦП та комутаторів при використанні їх у існуючих ІВС, то воно здійснюється базуючись на використанні більш досконалої елементної бази [1, 2, 5, 6]. Також для ПІ здійснюється корекція параметрів їх елементів шляхом фізичного впливу на них, зокрема лазерним припасуванням, введенні структурної надлишковості, що виражається у використанні додаткових аналогових і цифрових вузлів, а також функціональних блоків. Причому в ряді випадків додаткові аналогові вузли і блоки повинні мати високі метрологічні характеристики, що спричиняє за собою вказану вище проблему використання досконалої елементної бази або корекцію параметрів елементів. Окрім того, в даному випадку найчастіше значно ускладнюється алгоритм перетворення та знижується швидкодія.

Питання підвищення швидкодії у існуючих системах [1-4], [8] вирішується за рахунок зменшення динамічних похибок першого та другого роду  $\Delta''_{\text{дин}}$  [1]. При цьому користуються такою узагальненою моделлю похибки  $\Delta''_{\text{дин}}$

$$\Delta''_{\text{дин}} = \beta q(n-1),$$

де  $\beta$  – відносне значення швидкості вхідного сигналу,  $q$  – крок квантування,  $n$  – кількість розрядів ПІ. Зменшення даних похибок здійснюється як правило таким чином:

- схемними методами,
- використанням комбінованих методів аналого-цифрового перетворення,
- методами контролю та корекції процесу

аналого-цифрового перетворення у ВК.

Перераховані вище методи або занадто складні, або пов'язані із введенням до структури системи додаткової апаратури. Так, наприклад, третій підхід вимагає введення додатково до структури ІВС блоку контролю напруги, пристрою визначення полярності контрольної напруги, аналогового суматора, блоку керування та певну кількість схем порівняння (залежить від особливостей застосування методу). При цьому корекція похибок здійснюється згідно [1] діаграми станів компенсуючої напруги (рис. 2) за складним алгоритмом, що у свою чергу ускладнює використання описаних методів. Тут  $U_k$  та  $U_x$  – компенсуючі напруги.

Перспективним напрямком покращення характеристик ВК є введення в АЦП у його структурі вагової надлишковості, зокрема, у формі НПСЧ [7]. Вказаний підхід дає можливість у комплексі вирішувати ряд важливих при опрацюванні стрибкоподібних сигналів проблем, зокрема: зменшити похибку та підвищити швидкодію отримання виміральної інформації, а також знизити вартість перетворювача внаслідок можливості його побудови, на неточній елементній базі.

Аналіз методів підвищення точності та швидкодії ІВС для опрацювання стрибкоподібних сигналів показує, що на теперішній час недостатньо розглянуті методи підвищення точності комутаторів у складі ВК (зокрема шляхом коригування їх похибок), у системах як правило використовуються двійкові ПІ, не здійснюється ефективного (без додаткового обладнання) відновлення характеристик ВК залежно від змінення температури навколишнього середовища. У той же час перспективним є використання НПСЧ у АЦП, що у комплексі дозволяє підвищити точність та швидкодію ІВС із розробкою при цьому моделей коригованих похибок.

### Висновки

Проаналізовано способи покращення характеристик окремих складових елементів ВК ІВС, що дало

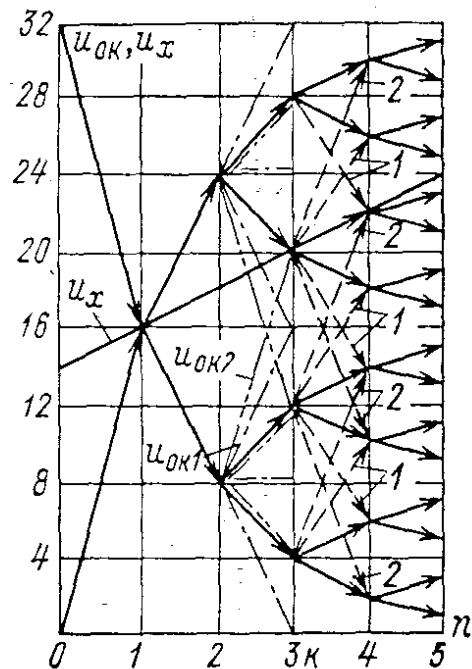


Рис. 2. Діаграми станів компенсуючої напруги

зможу виявити їх похибки для подальшого компенсування.

На основі проведеного аналізу сформовані рекомендації, щодо побудови ВК ІВС та аналізу похибок комутатора у складі каналу.

### Література

1. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров ; під заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
2. Роїк О.М. Інваріантні перетворення параметрів елементів складних об'єктів : монографія / Роїк О.М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 152 с.
3. Колесников А. Е. Акустические измерения / Колесников А. Е. – Л. : “Судостроение”, 1983. – 240 с.
4. Хмелевской В. К. Краткий курс разведочной геофизики / Хмелевской В. К. – М. : Изд-во МГУ. – 2005. – 154 с.
5. Коваленко Е.А. Разработка и исследование самокалибрующихся вычислительных АЦП и ЦАП для систем цифровой обработки аналоговой информации : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : 05.13.05 / Коваленко Е.А. / Винниц. гос. техн. ун-т. – Винниця, 1997. – 16 с.
6. Захарченко С.М. Исследование и разработка самокалибрующихся АЦП с накопителем заряда на основе избыточных позиционных систем счисления : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : 05.13.08 / Захарченко С.М. / Винниц. гос. техн. ун-т. – Винниця, 1997. – 16 с.
7. Азаров О. Д. Вимірювальна система для оцінювання активності точок акупунктури людини у стаціонарних та нестаціонарних умовах / О. Д. Азаров, А. В. Снігур // Вісник ВПІ. – Вінниця, 2006. – № 1. – С. 62–77.
8. Роїк О.М. Інваріантні перетворення параметрів елементів складних об'єктів : монографія / Роїк О.М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 152 с.

### References

1. Krupelnitskiy L. V., Azarov O. D. Anologo-tsifrovI pristroYi sistem, scho samokoriguyutsya, dlya vimIryuvan I obroblyannya nizkochastotnih signaliv: Monograflya. / PId zag. red. O. D. Azarova. – VInnitsya: UNIVERSUM-VInnitsya, 2005 – 167 s.
2. RoYik O.M. InvariantnI peretvorennya parametriv elementiv skladnih ob'Ektiv. Monograflya. – VInnitsya: UNIVERSUM-VInnitsya, 2001. – 152 s. II.
3. Kolesnikov A. E. Akusticheskie izmereniya. – L.: “Sudostroenie”, 1983. – 240 s.
4. Hmelevskoy V. K. Kratkiy kurs razvedochnoy geofiziki. M.: Izd-vo MGU. – 2005. – 154 s.
5. Kovalenko E.A. Razrabotka i issledovanie samokalibruyuschihsvya vyichislitelnyih ATsP i TsAP dlya sistem tsifrovoy obrabotki analogovoy informatsii. Avtoref. dis... kand. tehn. nauk: 05.13.05 / Vinnits. gos. tehn. un-t. - Vinnitsa, 1997. -16s.
6. Zaharchenko S.M. Issledovanie i razrabotka samokalibruyuschihsvya ATsP s nakopitelem zaryada na osnove izbyitochnyih pozitsionnyih sistem schisleniya. Avtoref. dis... kand. tehn. nauk: 05.13.08 / Vinnits. gos. tehn. un-t. - Vinnitsa, 1997. - 16 s.
7. Azarov O. D., SnIgur A. V. VimIryvalna sistema dlya otsInyuvannya aktivnostI tochok akupunkturi lyudini u statsIonarnih ta nestatsIonarnih umovah // VIsnik VPI. – VInnitsya; 2006. – N1. – S 62 – 77.
8. RoYik O.M. InvariantnI peretvorennya parametriv elementiv skladnih ob'Ektiv. Monograflya. – VInnitsya: UNIVERSUM-VInnitsya, 2001. – 152 s. II.

Рецензія/Peer review : 12.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Перевозніков С. І.



В.М. ЛИСОГОР  
Вінницький національний аграрний університет  
А.В. СНИГУР, Р.М. ВІКУЛОВ  
Вінницький національний технічний університет

## КОРИГОВАНІ І НЕКОРИГОВАНІ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ІВС ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ СТРИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ

*В статті проведеной аналіз коригованих і некоригованих похибок вимірювального каналу ІВС для опрацювання стрибкоподібних сигналів. На основі проведеного аналізу сформовані рекомендації щодо підвищення загальної точності вимірювання показників біологічно активних точок.*

*Ключові слова: стрибкоподібні сигнали, біологічно-активна точка, похибки, інформаційно-вимірювальна система.*

V. M. LISOGOR  
Vinnytsia National Agrarian University  
A. V. SNIGUR, R. M. VIKULOV  
Vinnytsia National Technical University

### CORRECTED AND UNCORRECTED ERRORS OF MEASURING CHANNEL IMS FOR WORKING OF SALTATORY SIGNALS

*Abstract – In the article the analysis of the corrected and uncorrected errors of measuring channel of YVS is conducted for working of saltatory signals. On the basis of the conducted analysis formed recommendation in relation to the increase of general exactness of measuring of indexes of biologically active points.*

*Keywords: saltatory signals, biologically-active point, errors, informatively-measuring system.*

#### Вступ

Підвищення загальної точності вимірювання параметрів стрибкоподібних сигналів у акустичних дослідженнях, сейсмозвідці та при діагностуванні стану здоров'я людини за допомогою біологічно-активних точок (БАТ) в значній мірі залежить від врахування похибок вимірювальних каналів (ВК) ІВС. Існуючі методи отримання параметрів перерахованих сигналів як правило враховують окремі складові загальної похибки, зокрема вплив шуму або погодинну активність меридіанів для БАТ. У той же час вирішення питання зменшення впливу похибок не здійснюється комплексно із врахуванням недоліків існуючих методів [1–5]. Отже, актуальною проблемою є комплексне врахування складових похибок ВК ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів.

#### Мета публікації

Метою публікації є аналіз статичних коригованих і некоригованих похибок ВК ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів та формування рекомендацій щодо підвищення загальної точності вимірювання параметрів сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: здійснити аналіз процесу формування загального результату вимірювання рівня струму (напруги) стрибкоподібного сигналу; розглянути похибки складових елементів ВК ІВС; сформувати рекомендації щодо підвищення загальної точності вимірювання параметрів сигналів.

#### Основний результат дослідження

Процес вимірювання параметрів стрибкоподібних сигналів у ВК ІВС зазнає впливу статичних похибок. Така обставина вимагає дотримання певних вимог щодо забезпечення метрологічних характеристик системи. Зменшення статичних похибок дозволяє здійснювати більш точні вимірювання у багатоканальних системах у сейсмозвідці, акустиці та у напрямку спостереження за точками акупунктури людини.

У загальному випадку похибку ІВС для опрацювання стрибкоподібних сигналів визначають похибки складових елементів її ВК. Вплив таких похибок на кінцевий результат вимірювання сигналів може виражатися у значному спотворенні їх форми, що в подальшому, наприклад, ускладнює пошук корисних копалин. Нижче наведений рисунок (рис. 1) із зазначеними спотвореннями.

Розглянемо, як формується загальний результат вимірювання у ІВС (рис. 2) рівня струму (напруги) стрибкоподібного сигналу (рис. 1). Тут  $k$  – кількість каналів, знаком плюс позначений суматор,  $K_1$ ,  $K_2$  – комутатори, ПВЗ – пристрій вибірки і зберігання, СЦОП – спеціалізований цифровий обчислювальний пристрій, ЦАП – калібрувальний ЦАП, БК – блок керування,  $y_i$  – сигнали керування,  $\Phi$  – фільтри, АЦП із с/к – АЦП із самокалібруванням.

На основі описаного вище, розглянемо похибки складових елементів ВК ІВС (рис. 3). Проходячи через давач Д ВК, сигнал зазнає впливу похибки зміщення нуля  $\Delta_{0d}$  давача та похибки лінійності його передатної характеристики, в результаті на виході отримується напруга  $U_d$ . Потім сигнал проходить через підсилювач П, тут впливають похибки: зміщення нуля підсилювача  $\Delta_{0n}$ , масштабу  $\Delta_{mn}$ , лінійності  $\Delta_{ln}$ , в результаті на виході П отримується напруга  $U_n$ . Після проходження П, сигнал поступає на комутатор К, де зазнає впливу похибок  $b_i$  – прямого проходження сигналу через закриті ключі, в результаті на виході К

отримується напруга  $U_k$ . У АЦП сигнал врівноважуються, однак тут впливають похибки: зміщення нуля  $\Delta_0$ , масштабу  $\Delta_m$ , лінійності  $\Delta_l$ , в результаті перетворення на виході АЦП формується вихідний код  $N_{вих}$ , який подається у цифрову частину ІВС.

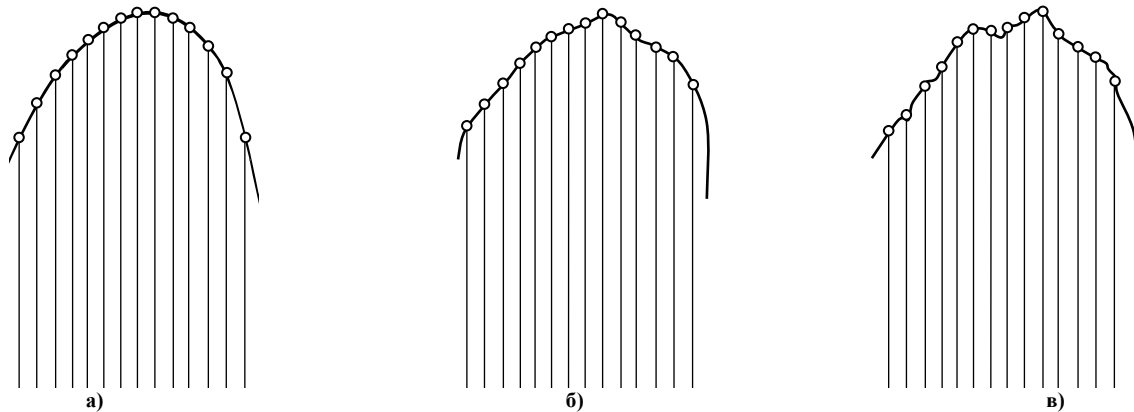


Рис.1. Спотворення квантованого сейсмосигналу за умови впливу похибок масштабу та нуля:  
а – ідеальне квантування; б – вплив похибок масштабу; в – вплив похибок нуля та масштабу

Розглянемо рекомендації щодо зменшення статичних похибок. Статичні похибки ВК у значній мірі можна зменшити шляхом калібрування його передатної характеристики, зокрема шляхом коригування похибок зміщення нуля і похибок масштабу. У будь-якому ВК мають місце інструментальні похибки: давачів, підсилювачів, комутатора, АЦП. Враховуючи, що підсилювач, який використовується у системі, може мати відносно великий коефіцієнт підсилення та відповідно вносити велику похибку у канал, то спочатку розглянемо даний елемент. Статична передатна характеристика підсилювача у складі ВК може бути апроксимована виразом [6]

$$U_{вих.л.}(U_{вх.}) = a_0 + a_1 \cdot U_{вх.} + \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cdot U_{вх.}^i,$$

де  $a_0$  – адитивна складова похибки (відповідає похибці зсуву “нуля”),  $a_1$  – мультиплікативна складова (коефіцієнт підсилення),  $a_i$  – коефіцієнти, які характеризують відхилення форми статичної передатної характеристики від прямої лінії (як правило в розрахунках обмежуються  $i \leq 5$ ).

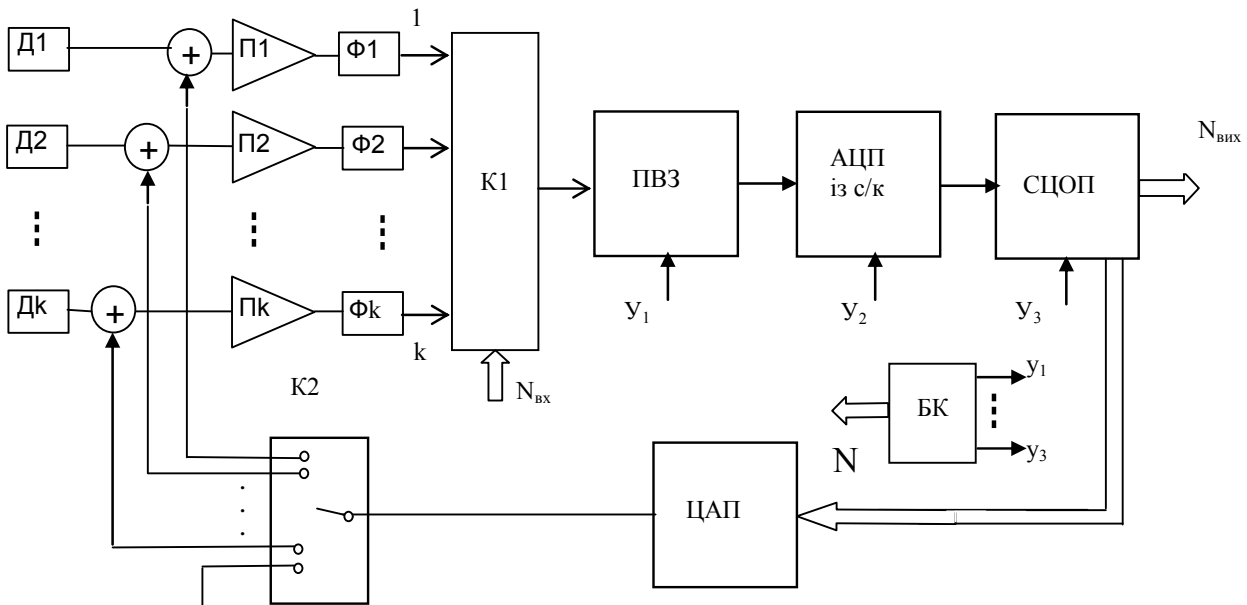


Рис. 2. ІВС із самокалібруванням

Відхилення  $a_0, a_1, a_i$  від ідеальних значень  $a_{0и}, a_{1и}, a_{ии}$  визначають похибки:

адитивну  $\Delta_0 = a_{0и} - a_0,$

мультиплікативну  $\Delta_m = a_1 / a_{1и},$

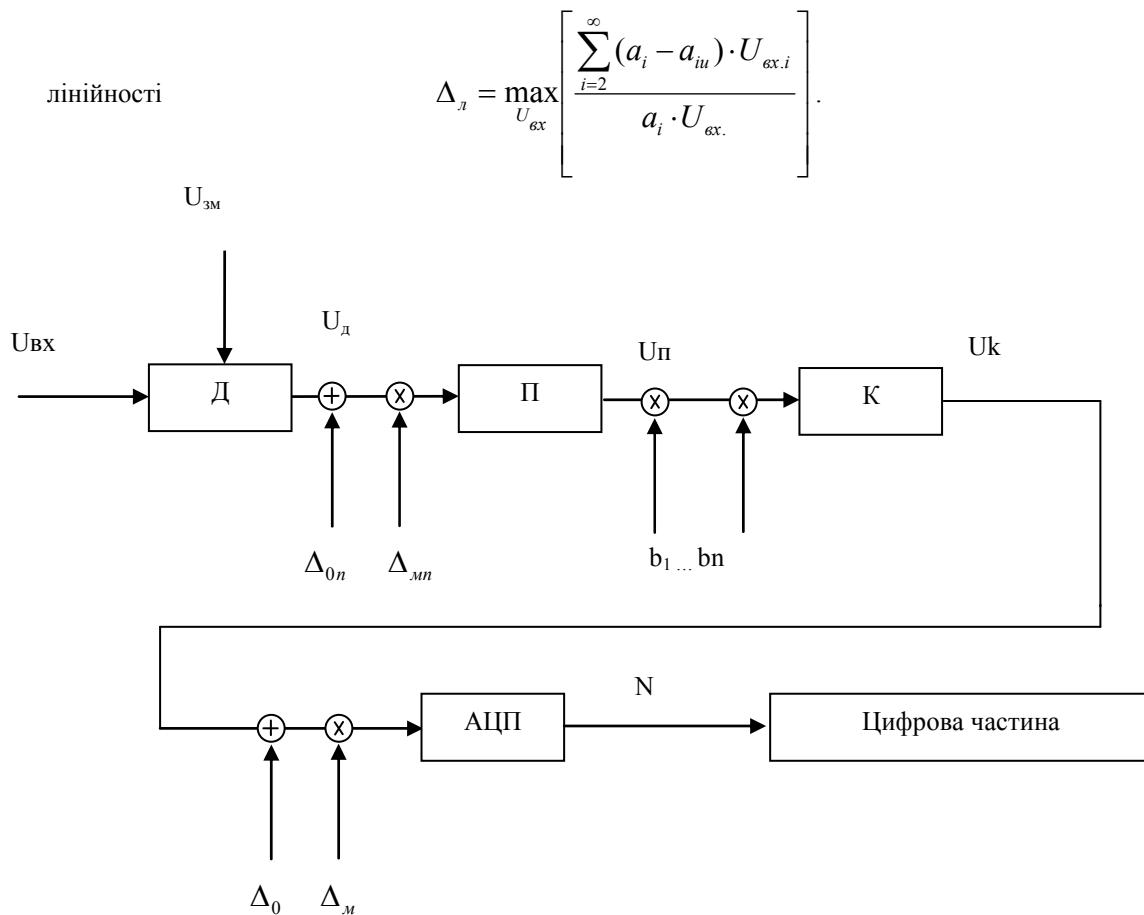


Рис. 3. Модель складових інструментальних похибок аналогової частини ВК

Коригування даних похибок можна здійснювати при вмиканні ІВС та після змінення температури навколишнього середовища.

Характерною особливістю сучасних ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів є наявність у складі їх ВК АЦП на основі звичайної двійкової системи числення [2–7]. Взагалі у всіх зазначених ПІ в процесі експлуатації під дією різних зовнішніх факторів (наприклад температури, природного процесу старіння елементів) змінюються метрологічні характеристики, що може призводити до отримання помилкових значень вимірювальних параметрів сигналів.

Застосування НПСЧ у АЦП дає можливість покращити характеристики як АЦП так і каналу в цілому шляхом здійснення процедури самокалібрування. Під самокалібруванням розуміється коригування похибок ВК із перериванням основного режиму роботи системи (вимірювання). Багатозначність представлення чисел у надлишковій системі дає можливість усунути розриви у характеристиці передачі АЦП, здійснювати періодично самокалібрування пристрою, наприклад при зміні температури навколишнього середовища, порівняно із двійковими, та додатково підвищити швидкодію та точність перетворення внаслідок компенсації динамічних похибок першого та другого роду. Окрім цього такі перетворювачі можна будувати на неточній елементній базі – за спрощеною технологією без використання лазерного припасування із максимально допустимою відносною інструментальною похибкою формування ваг розрядів  $\delta Q_{i \max}$ .

Комутатор у складі ВК ІВС характеризується похибкою прямого проходження сигналів через закриті ключі. Коригування даних похибок можливе при введенні у структуру ІВС додаткового ЦАП для подачі тестових сигналів. Якщо подати однакову тестову напругу  $U_{\text{вх.ком}}$  одночасно на всі входи К (тільки один ключ розімкнений), то на основі (2.3) для відкритого першого входу (розімкнений ключ) отримаємо таке рівняння

$$U_{\text{вих.ком.1}} = U_{\text{вх.ком.1}} + b_{1,2} U_{\text{вх.ком.2}} + b_{1,3} U_{\text{вх.ком.3}} + \dots + b_{1,n} U_{\text{вх.ком.n}}$$

де  $b_{i,n}$  – похибки від неповного замикання  $i$ -го ключа,  $n$  – кількість входів комутатора.

Подаючи однакові  $U_{\text{вх.ком}}$  на розімкнуті по черзі  $n$  входів К, можна отримати систему з  $n$  рівнянь та  $n$  невідомих  $b_i$ . Розв’язуючи дану систему відносно  $b_i$  та записуючи обчислені значення у пам’ять СЦОП каналу, можна в подальшому враховувати похибки від неповного замикання шляхом обчислення вхідних напруг для кожного з входів на основі зазначеної системи. Щодо характеристик давачів, то в даній роботі розглядається похибка зміщення нуля.

Основні похибки елементів ВК ІВС наведені у таблиці 1. Зменшення впливу перелічених похибок можливо здійснювати шляхом їх послідовного виключення із кінцевого результату вимірювання. Проте

існує можливість калібрування похибок зміщення нуля та масштабу каналу у цілому за допомогою АЦП на основі НПСЧ.

Таблиця 1

## Похибки елементів ВК системи

Елементи ВК	Похибки	Можливо коригувати
Давачі	зсув “нуля” $\Delta_{0d}$ , масштабу $\Delta_{md}$	$\Delta_{0d}$ , $\Delta_{md}$
Підсилювачі	зсув “нуля” $\Delta_{0n}$ , масштабу $\Delta_{mn}$ , лінійності $\Delta_{ln}$	$\Delta_{0n}$ , $\Delta_{mn}$ , $\Delta_{ln}$
Комутатор	Міжканальні завади	не коригуються
	Рівень струму на виході при замкнених ключах $b$ , зсув нуля $\Delta_{0k}$	$b$ , $\Delta_0$
ПВЗ	зсув “нуля” $\Delta_{0nv}$ , масштабу $\Delta_{mrv}$	$\Delta_{0nv}$ , $\Delta_{mrv}$
АЦП	зсув “нуля” $\Delta_0$ , масштабу $\Delta_m$ , лінійності $\Delta_l$	$\Delta_0$ , $\Delta_m$ , $\Delta_l$

Застосування АЦП із ваговою надлишковістю у структурі ВК системи дозволяє послідовно включати у його коло калібрування елементи каналу, калібрувати характеристики каналу в цілому та зменшувати вплив похибок його складових елементів на кінцевий результат вимірювання стрибкоподібних сигналів.

## Висновки

Проаналізовано процес формування загального результату вимірювання рівня струму (напруги) стрибкоподібного сигналу, що дало змогу виявити статичні похибки ВК ІВС.

На основі проведеного аналізу сформовані рекомендації, що дозволять підвищити загальну точність вимірювання параметрів стрибкоподібних сигналів на основі калібрування характеристик ВК системи.

## Література

1. Азаров О. Д. Вимірювальна система для оцінювання активності точок акупунктури людини у стаціонарних та нестаціонарних умовах / О. Д. Азаров, А. В. Снігур // Вісник ВПІ. – Вінниця, 2006. – № 1. – С. 62–77.
2. Роїк О.М. Інваріантні перетворення параметрів елементів складних об'єктів : монографія / Роїк О.М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 152 с.
3. Колесников А. Е. Акустические измерения / Колесников А. Е. – Л.: “Судостроение”, 1983. – 240 с.
4. Ando Y. Concert hall acoustics. Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 2005.
5. Основи метрології та вимірювальної техніки / [ М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик ] ; за ред. Б. Стадника. – Львів : Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. – 655 с.
6. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров ; під заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
7. Пат. 23748 Україна, МПК А 61 Н 39/00. Пристрій для електропунктури / О.Є. Орел, В.В. Фролов, К.Ю. Нальотов ; заявник патенту, власник патенту – Закрите товариство «Асоціація ТЕМП». – № 97031416; заявл. 26.03.97 ; опубл. 28.02.2000, Бюл. № 1. 13 с.

## References

1. Azarov O. D., Snigur A. V. Vимiryvalna sistema dlya otsinyuvannya aktivnosti tochk akupunkturi lyudini u statsionarnih ta nestatsionarnih umovah // Visnik VPI. – Vinnitsya; 2006. – N1. – S 62 – 77.
2. RoYik O.M. Invariantni peretvorenniya parametriv elementiv skladnih ob'ektiv. Monografiya. – Vinnitsya: UNIVERSUM-Vinnitsya, 2001. – 152 s. Il.
3. Kolesnikov A. E. Akusticheskie izmereniya. – L.: “Sudostroenie”, 1983. – 240 s.
4. Ando Y. Concert hall acoustics. – Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 2005.
5. Osnovi metrologiyi ta vimiryvalnoyi tehniky / [ M. Dorozhovets, V. Motalo, B. Stadnik, V. Vasilyuk, R. Borek, A. Kovalchik ]; za red. B. Stadnika. – Lviv: Vidavnistvo Natsionalnogo unversitetu “Lvivska politehnika”, 2005. – 655s.
6. Krupelnitskiy L. V., Azarov O. D. Analogo-tsifrovI pristroyi sistem, scho samokoriguyutsya, dlya vimiryuvan I obroblyannya nizkochastotnih signaliv: Monografiya. / PId zag. red. O. D. Azarova. – VInnitsya: UNIVERSUM-VInnitsya, 2005 – 167 s.
7. Pat. 23748 UkraYina, MPK A 61 N 39/00 PristrIy dlya elektropunkturi/ O.E. Orel, V.V. Frolov, K.Yu. Nalotov, zayavniki patentu, vlasnik patentu – Zakrite tovaristvo «AsotislatsIya TEMP» - № 97031416; zayavl. 26.03.97; opubl. 28.02.2000, Byul. №1. – 13 s.

Рецензія/Peer review : 12.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Перевозніков С. І.

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОГО ДІОДА

*В статті надано характеристики мікроелектронного перетворювача тиску з частотним виходом у вигляді автогенераторної схеми на основі тунельно-резонансного діода, в якій діод є первинним перетворювачем тиску. На базі еквівалентної схеми перетворювача отримано залежність вихідного сигналу від часу, функцію перетворення і чутливість. Чутливість пристрою залежить від режиму живлення по постійному струму і величини тиску, що діє на перетворювач, вона змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.*

*Ключові слова: тунельно-резонансний діод, тиск, частота, від'ємний опір.*

V.S. OSADCHYK, A.V. OSADCHYK, Y.A. OSADCHYK

Vinnitsia National Technical University

### MICROELECTRONIC PRESSURE TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT ON THE BASIS OF TUNNEL RESONANCE DIODES

*Abstract - The article describes the characteristics of microelectronic pressure transducer frequency output in the form of self-oscillator circuit based on resonant tunnelling diode, in which the diode is the primary pressure transducer. Based on the equivalent circuit of the converter dependence of the output signal from the time conversion function and sensitivity. The sensitivity depends on the device's power DC and the pressure acting on the transducer, it varies from 2.25 kHz/kPa to 0.35 kHz/kPa.*

*Keywords: resonance tunnelling diode, pressure, frequency, negative resistance.*

#### Вступ

Напівпровідникові прилади, які мають від'ємний диференційний опір, можна використовувати для побудови різноманітних перетворювачів фізичних величин, зокрема перетворювачів тиску [1–3]. Вони дозволяють створювати одночасно автогенераторний пристрій, в якому сам напівпровідниковий прилад з від'ємним опором виступає первинним перетворювачем тиску. Таким приладом є тунельно-резонансний діод. Частотний принцип роботи сенсорів тиску має ряд переваг перед амплітудними, які полягають у високій завадостійкості, що приводить до високої точності вимірювання, а також мають високе значення вихідного частотного сигналу. Вимірювальні прилади з частотним вихідним сигналом дозволяють відмовитись від аналогово-цифрового перетворення і подальшого підсилення вихідного сигналу, що значно здешевлює систему вимірювання і контролю. Використання реактивних властивостей і від'ємного опору, що залежить від дії тиску у напівпровідникових структурах, дозволяє будувати мікроелектронні перетворювачі тиску, які легко узгоджуються з мікропроцесорними пристроями обробки сигналів, а у свою чергу дозволяє створювати "інтелектуальні сенсори".

Проте дослідження характеристик перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором лише починається, особливо це стосується новітніх розробок мікроелектронних приладів з від'ємним диференціальним опором, які працюють на основі квантово-механічних явищ, таких як тунельно-резонансні діоди [4].

#### Математична модель

Розглянемо принцип роботи тунельно-резонансного діода. Він працює на основі квантово-механічних ефектів, які полягають у квантуванні енергії електронів і їх тунелюванні через потенціальні бар'єри. Діод складається з наночарових структур  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ , які утворюють двобар'єрну гетероструктуру, в якій шар  $GaAs$  утворює потенціальну яму, що розташована між двома  $AlGaAs$  потенціальними бар'єрами. До двобар'єрної системи створюють з двох сторін шар  $n-GaAs$ , який слугує контактами, що поставляють електрони у прилад. В потенційній ямі структури розташовано резонансний енергетичний рівень. Якщо енергія електрона, який знаходиться у потенційній ямі співпадає або трохи більше енергії резонансного енергетичного рівня, то електрон тунелює через потенційну яму структури. При підвищенні прикладеної постійної напруги енергія електронів зростає і наближається до значення енергії резонансного рівня, що приводить до зростання струму. Подальше збільшення прикладеної напруги приводить до значного зростання енергії електронів, що суттєво перевищує енергію резонансного рівня, тому тунелювання електронів через потенційну яму різко зменшується, що приводить до значного зменшення струму. Таким чином, на вольт-амперній характеристиці діода утворюється спадаюча ділянка, тобто струм падає, а напруга зростає, що відповідає утворенню диференціального від'ємного опору [1, 4].

Розглянемо вплив тиску на характеристики тунельно-резонансного діода. При прикладенні зовнішнього тиску до діоду відбувається зміна ефективної маси електрона і генерації п'єзоелектричних полів у потенційній ямі і потенціальних бар'єрах структури. Гідростатичні тиски викликають зміну ефективної маси електронів, які змінюють розташування енергетичних рівнів у потенційній ямі. При прикладенні одновісних або двовісних тисків п'єзоелектричні поля індукують значно більший внесок в енергію електронів, ніж у зміну їх ефективних мас. Зміна енергетичних станів електронів внаслідок дії тиску

приводить до зміни вольт-амперної характеристики, а також до зміни частоти генерації [5–8].

Енергетична схема генератора подана на рис.1. Вона складається з джерела живлення з постійним струмом  $U_p$ , опору втрат  $R$ , індуктивності  $L$ , яка з'єднана послідовно з ємністю  $C$ , паралельно якій підключено тунельно-резонансний діод  $VD1$ . Для розрахунку вихідної змінної напруги автогенераторного сенсора тиску скористаємося його еквівалентною схемою, складеною на основі електричної схеми (рис.1). На рис. 2 надано еквівалентну схему сенсора тиску.

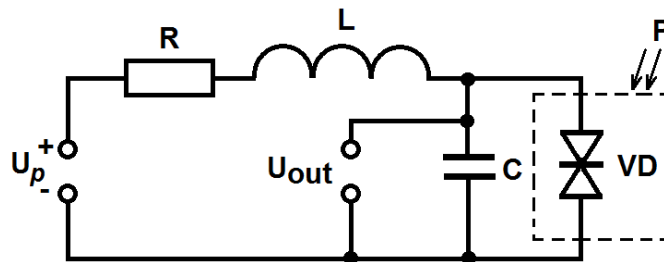


Рис.1. Електрична схема сенсора тиску на основі тунельно-резонансного діода з частотним вихідним сигналом

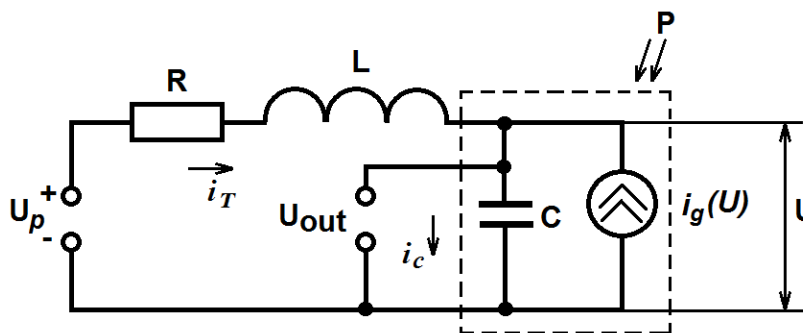


Рис.2. Еквівалентна схема сенсору тиску

На схемі (рис. 2) сумарна індуктивність  $L$  включає в себе зовнішню індуктивність коливального контуру та індуктивність виводів схеми, опір  $R$  включає в себе опір навантаження та опір виводів схеми, ємність  $C$  включає в себе зовнішню ємність коливального контуру і внутрішню ємність тунельно-резонансного діода. Розвиток процесів в цій схемі пов'язаний із зміною струму  $i_T$  і напруги  $U$ :

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - i_T - U}{L}, \tag{1}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C}. \tag{2}$$

Рівняння (1) і (2) можна об'єднати шляхом ділення першого на друге, тобто

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - i_T R - U}{i_T - I(U)} \cdot \frac{C}{L}. \tag{3}$$

В стані рівноваги ( $U_0, i_{T0}$ ) струми і напруги в схемі не змінюються, тому

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0, \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \tag{4}$$

Використовуючи умову (4) з рівнянь (1) і (2) знаходимо

$$U_p - i_{T0} R - U_0 = 0, \tag{5}$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \tag{6}$$

Стан схеми згідно (5) і (6) реалізується в точках перетину статичної вольт-амперної характеристики і лінійною статичного навантаження схеми

$$I(U_0) = (U_p - U_0) / R, \tag{7}$$

який є станом рівноваги досліджуваної схеми. Для розгляду роботи схеми в динамічному режимі введемо в рівняння (1) і (2) нові змінні, які мають вигляд:

$$U = U - U_0, \tag{8}$$

$$i = i_T - i_{T0}. \tag{9}$$

Нелінійну статичну вольт-амперну характеристику тунельного резонансного діода поблизу стану рівноваги замінімо лінійною функцією

$$I(U_0 + u) = I(U_0) + u / R_g, \quad (10)$$

де  $R_g$  – диференційний від'ємний опір в точці рівноваги. Нелінійну смність на електродах тунельно-резонансного діода поблизу стану рівноваги вважають постійною величиною, яка не залежить від напруги. Враховуючи ці зауваження рівняння (1) і (2) перетворюються у лінійні з постійним коефіцієнтами:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}, \quad (11)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_g C}. \quad (12)$$

Для визначення характеристичного рівняння на основі (11) і (12) необхідно провести диференціювання напруги за часом у рівнянні (12)

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{di}{dt} \cdot \frac{1}{C} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (13)$$

Підставимо у вираз (13) замість  $di/dt$  його значення з (11), тобто

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \left( -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L} \right) \cdot \frac{1}{C} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (14)$$

З другого боку, згідно з еквівалентною схемою сенсора тиску (рис.2) можна записати

$$i = i_C + i_g, \quad (15)$$

де  $i_g = u/R_g$ . При підстановці (15) у (14) отримаємо рівняння

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (16)$$

Характеристичне рівняння системи має вигляд

$$x^2 + x \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (17)$$

Корені характеристичного рівняння визначаються з (17)

$$x_{1,2} = \frac{-\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right)^2 + \frac{4}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)}}{2} = 0. \quad (18)$$

Згідно з теорією стійкості Ляпунова, корені характеристичного рівняння (18) визначають стан рівноваги системи. Якщо  $x_1$  і  $x_2$  мають дійсні значення, то при  $x_{1,2} < 0$  будь-яке початкове відхилення в системі буде затухати за експонентним законом, а при  $x_{1,2} > 0$  – наростати. Якщо  $x_{1,2} = a \pm jb$  (комплексні величини), то в системі можливі синусоїдальні коливання, причому при  $a > 0$  коливання наростають, а при  $a < 0$  – затухають.

Розв'язок рівняння (16) можна записати у вигляді

$$u(t) = A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t + \\ + B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) - \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t, \quad (19)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти, які визначаються з початкових умов. Дві складові рівняння (19) описують періодичний процес, амплітуда якого наростає за експонентним законом. Умова виникнення синусоїдальних коливань в системі описується нерівностями

$$\left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right) < 0, \quad (20)$$

$$\frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) > 0. \quad (21)$$

Таким чином, збудження коливань на резонансній частоті у сенсорі тиску буде мати місце при виконанні умов (20) і (21). Резонансна частота визначається з повного вхідного опору (рис.2), який описується рівнянням

$$Z = R + \frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} + j \left( \omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right). \quad (22)$$

Під час виконання умови

$$\omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} = 0 \quad (23)$$

в схемі наступає резонанс. З рівняння (22) визначаємо резонансну частоту, тобто функцію перетворення, що описує залежність резонансної частоти від тиску:

$$F_p(P) = \frac{1}{2\pi R_g(P)C_{ekv}} \sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1}. \quad (24)$$

Чутливість сенсора тиску визначається з формули (24) і описується рівнянням

$$S_{P}^{F_p} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1} \left( \frac{dR_g(P)}{dP} \right)}{\pi R_g^2(P)C_{ekv}} + \frac{1}{2} \frac{\frac{dR_g(P)}{dP}}{\pi L \sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L} - 1}}. \quad (25)$$

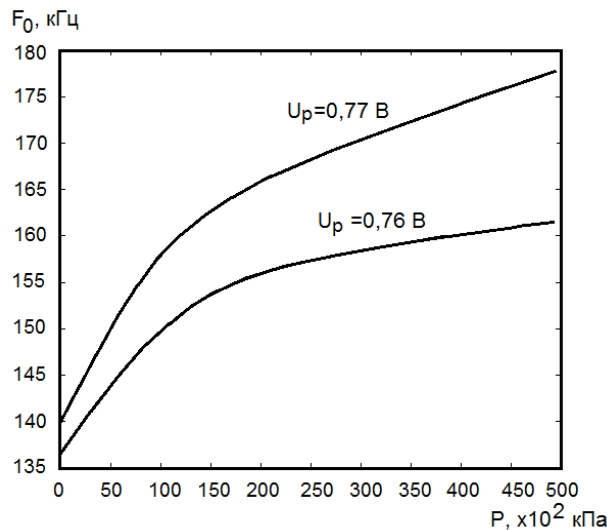


Рис. 3. Залежність частоти генерації від тиску

На рис.3 надано залежність частоти генерації від тиску. Як видно з графіка, частота зростає більш різко при малих тисках (до 150·10<sup>2</sup> кПа) і менших напругах живлення (0,76 В). Така поведінка функції перетворення, тобто, залежність частоти генерації від тиску, пояснюється зміною величини від'ємного опору і в меншій степені зміни еквівалентної ємності коливальної системи автогенератора.

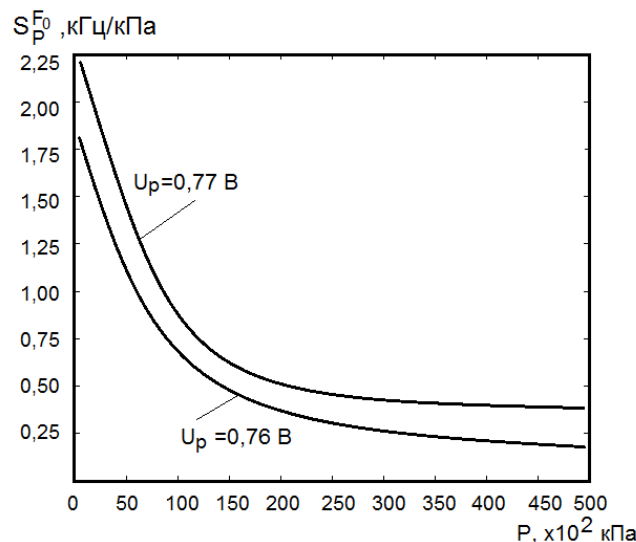


Рис. 4. Залежність чутливості від тиску



На рис.4 надано залежність чутливості від тиску. Аналіз цього графіка показує, що існують певні діапазони тиску і діапазони живлення з постійної напруги, при яких чутливість має максимальне значення і змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

### Висновки

На основі розв'язку рівняння коливальної системи тунельно-резонансного діода, який виступає в якості сенсора тиску, отримано функцію перетворення, що описує залежність частоти генерації від тиску, а також рівняння чутливості. Чутливість сенсора тиску змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

### Література

1. Гаряинов С.А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С.А. Гаряинов, М.Д. Абезгауз. – М. : Энергия, 1970. – 320 с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000. – 302 с.
3. Осадчук В.С. Сенсори тиску і магнітного поля / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2005. – 207 с.
4. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Атумао-Русда. – М. : Техносфера, 2007. – 368 с.
5. A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes / K. Fobelets, R. Vounckx, and Borghs. J. Micromech. Microeng. 4. pp.123–128, 1994.
6. Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure / A. Di Carlo and P. Lugli. Semicond. Sci. Technol., vol.10, pp.1673–1679, 1995.
7. Resonant tunneling in (001)- and (111)-oriented III-V double barrier heterostructures under transverse and longitudinal stresses / J.D. Albrecht, L.Cong, P.P. Ruden, M.I. Nathan and D.L. Smith. J. Appl. Phys. vol.79. no. 10, pp.7763-7769, May 1996.

### References

1. Garyainov S.A. Semiconductor devices with negative resistance / S.A. Garyainov, M.D. Abezgaуз - M.: Energy, 1970. - 320 p.
2. Osadchuk O.V. Microelectronic frequency transducers based on the transistor structures with negative resistance / O.V. Osadchuk – Vinnitsa, "Universum-Vinnitsa", 2000. – 303 p.
3. Osadchuk V.S. Pressure sensors and magnetic field / V.S.Osadchuk, O.V. Osadchuk - Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 2005. - 207 p.
4. Martinez-Duarte J. M. Nanotechnology for micro- and optoelectronics / J. M. Martinez-Duarte, R.J. Martin Palma, F. Atumao-Rusdem -M.: Technosphere, 2007. -368 p.
5. Fobelets K. A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes. K. Fobelets, R. Vounckx, and Borghs. J. Micromech. Microeng. 4. pp.123-128, 1994.
6. Di Carlo A. Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure / A. Di Carlo and P. Lugli. Semicond. Sci. Technol., vol.10, pp.1673-1679, 1995.
7. Albrecht J.D. Resonant tunneling in (001)- and (111)-oriented III-V double barrier heterostructures under transverse and longitudinal stresses / J.D. Albrecht, L.Cong, P.P. Ruden, M.I. Nathan and D.L. Smith. J. Appl. Phys. vol.79. no. 10, pp.7763-7769, May 1996.

Рецензія/Peer review : 25.12.2014 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., Кичак В.М.

## РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОТРАНЗИСТОРОМ ТА ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

*У статті розроблено радіовимірювальний перетворювач магнітного поля з двоколекторним магнітотранзистором та частотним вихідним сигналом. Принцип роботи розробленого радіовимірювального перетворювача магнітного поля базується на основі автогенератора на транзисторній структурі з від'ємним опором. Також проведено експериментальні дослідження залежності частоти вихідного коливання розробленого радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля.*

*Ключові слова: радіовимірювальний перетворювач, магнітотранзистор, напруженість магнітного поля.*

O.V. OSADCHUK, M.O. PRYTULA, K.O. KOVAL  
Vinnytsya National Technical University

### THE RADIOMEASURING CONVERTER OF THE MAGNETIC FIELD WITH MAGNETIC TRANSISTOR AND FREQUENCY OUTPUT SIGNAL

*The radiomeasuring converter of the magnetic field with magnetic transistor and frequency output signal was developed. The principle of the developed radiomeasuring converter of the magnetic field is based on the oscillator on the transistor structure with negative resistance. Also the experimental research output oscillation frequency depends developed transducers on the magnetic field is conducted.*

*Keywords: radiomeasuring converter, magnetic transistor, the magnetic field.*

#### Вступ

Одним з перспективних напрямків сучасної напівпровідникової мікроелектроніки є розробка датчиків магнітного поля (ДМП), здатних визначати напрямок і вимірювати напруженість магнітного поля. Вони широко використовуються в медицині, в автомобілебудуванні, в дефектоскопії, в геології при дослідженні нових родовищ, при розробці позиціонуючих і навігаційних систем і в багатьох інших сферах [1].

Використання існуючих ДМП у складі сучасних інтегральних пристроїв в даний час пов'язане з низкою недоліків, основними з яких є низька чутливість ДМП до магнітного поля і відсутність універсальної технології виготовлення функціональної інтегральної схеми і ДМП під час одного технологічного циклу. Актуальним завданням є розробка сучасних ДМП для їх використання у складі мікросистеми та конструкції і технології повного інтегрального виконання елементів датчика за допомогою КМОП технології [2].

Головним компонентом магніточутливої мікросистеми є магніточутливого елемент (МЧЕ), що перетворює магнітний потік в електричний сигнал. Найбільш важливим параметром МЧЕ є магнітна чутливість. Одним із МЧЕ є двоколекторний біполярний магнітотранзистор (ДКБМТ). Важливими властивостями ДКБМТ є лінійність вихідного сигналу, висока роздільна здатність, високе відношення сигнал-шум, можливість створення тривимірних векторних датчиків магнітного поля [1].

Таким чином, розробка, вивчення та експериментальне дослідження радіовимірювального перетворювача, де в якості магніточутливого елементу використовується двоколекторний магнітотранзистор, є актуальним завданням.

Метою статті є розробка електричної схеми радіовимірювального перетворювача магнітного та її експериментальне дослідження на основі теоретичних засад роботи магнітотранзистора.

#### Аналіз принципу дії двоколекторного магнітотранзистора

Двоколекторний магнітотранзистор являє собою біполярний транзистор, колектор у якого розділений на дві частини (рис. 1, а). За відсутності магнітного поля інжектовані емітером носії заряду розподіляються рівномірно між колекторами і їхні струми рівні. Відповідно потенціали колекторів однакові (при рівних колекторних опорах  $R_k$  рис. 1, а), і різниця напруг між колекторами дорівнює нулю ( $U = 0$ ). Поперечне магнітне поле відхиляє потік носіїв у бік одного з колекторів ( $K_2$ ), що приводить до збільшення його струму і зменшення струму іншого колектора ( $K$ ). З цієї причини потенціал одного колектора зменшується, а іншого збільшується і напруга між колекторами росте зі збільшенням індукції магнітного поля. При зміні напрямку магнітного поля змінюється і знак напруги між колекторами [3].

Крім основного ефекту – перерозподілу інжектованих носіїв між колекторами у такому магнітотранзисторі одночасно діє й ефект зміни ефективної довжини бази. Наприклад, у  $p-n-p$  транзисторі (рис. 1, а) зміна траєкторії руху дірок у магнітному полі приводить до того, що ефективна довжина бази в лівій частині транзистора зменшується, а в правій збільшується. Явище зміни ефективної довжини бази знижує чутливість двоколекторного магнітотранзистора, тому що він збільшує струм колектора  $K$  і зменшує струм колектора  $K_2$ , тобто його дія протилежна дії ефекту перерозподілу носіїв між колекторами [2].

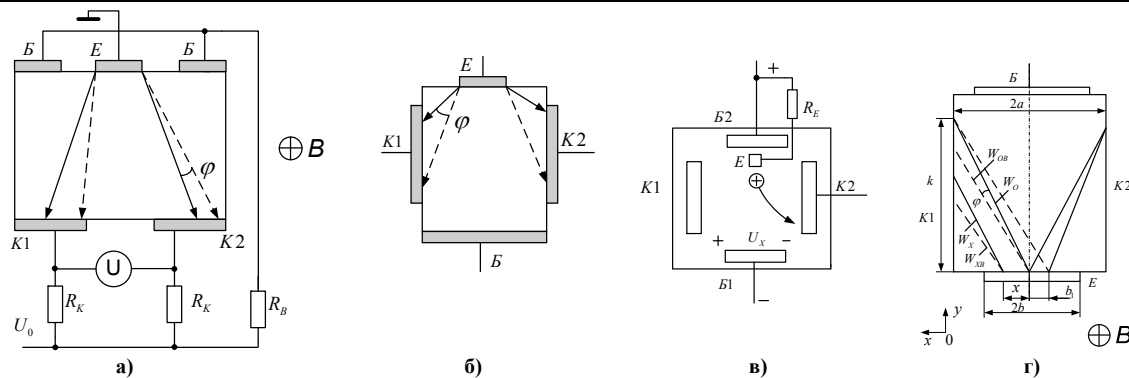


Рис. 1. Структури двоколекторних магніотранзисторів

Цей недолік усунутий у структурі магніотранзистора, показаного на рис. 1, б. Магнітне поле в цьому випадку також перерозподіляє інжектовані носії з одного колектора в другий. Одночасно воно зменшує ефективну довжину бази в тій частині зразка, де струм колектора K2 збільшується, і збільшує в тій частині, де струм колектора K зменшується. Отже, зміна ефективної довжини бази приводить до додаткового збільшення струму колектора K2 і додатковому зменшенню струму колектора K.

Проведено розрахунок коефіцієнтів передачі струму двоколекторного магніотранзистора  $h_{21B1}$  і  $h_{21B2}$  у колектори K і K2 на основі структури рис. 1, г, де колектори розташовані по всій поверхні бічних граней. Спочатку будемо вважати емітер близьким до точкового і розглянемо рух носіїв у бік колектора K. Інкєтовані в базу носії рухаються в напрямку  $y$  зі швидкістю  $v = \mu E$  (напруженість електричного поля досить велика, так що швидкість дрейфу в цьому напрямку набагато більша швидкості дифузії). Одночасно вони дифундують у поперечному напрямку  $x$  і попадають у колектор K через час дифузії  $\tau_D = a^2 / (2D)$ . У напрямку  $y$  вони проходять за цей час відстань  $h = v\tau_D = \mu E a^2 / (2D) = a^2 E \chi$ , де  $\chi = q / (2kT)$ . Ефективна довжина бази  $W_0^2 = a^2 + h^2$ . Коефіцієнт передачі струму звичайного транзистора з довгою базою при дрейфовому переносі [1]

$$h_{21B} = \exp(-W / \mu E \tau) \approx 1 - (W / \mu E \tau), \tag{1}$$

де  $W$  – довжина бази (експонента розкладена в ряд, оскільки показник менший),  
 $\tau$  – час життя інжектованих носіїв.

За відсутності магнітного поля  $W = W_0$ . У магнітному полі носії відхиляються у бік колектора на кут Холла  $\varphi$  і траєкторія їхнього руху скорочується (штрихова лінія на рис. 1, г). На основі простих геометричних розрахунків, вважаючи  $W_0 \approx h$  при невеликих  $\varphi$  ( $tg\varphi \ll 1$ ) з рис. , г, маємо [1]

$$W_{0B} = W_0 a / (h \cdot tg\varphi + a) = a^2 E \chi (1 - a \chi E \cdot tg\varphi). \tag{2}$$

Підставивши рівняння (2) в (1), з врахуванням  $tg\varphi = \mu B$  одержимо

$$h_{21B1} = 1 - (a^2 \chi / \mu \tau) (1 - a \chi E \mu B). \tag{3}$$

У реальній конструкції емітер витягнутий у напрямку  $x$ , отже, довжина траєкторії (відстань від емітера до колектора) для носіїв, інжектованих з різних частин емітера, неоднакова. Тому формулою (3) можна користатися лише для малої ділянки  $dx$ , розташованої на відстані  $x$  від осі симетрії транзистора. Відповідно

$$h_{21B1}(x) = 1 - [(a - x)^2 \chi / \mu \tau] * [1 - (a - x) \chi E \mu B].$$

Струм через відповідну ділянку колектора K дорівнює

$$dI_{K1} (I_E / 2b) h_{21B1}(x) dx,$$

а через весь колектор

$$I_{K1} = (I_E / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx.$$

Тоді, коефіцієнт передачі струму дорівнює

$$h_{21B1} = (1 / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx. \tag{4}$$

Підставивши рівняння (3) в (4) та проінтегрувавши, одержимо вираз [3]

$$h_{21B1} = \frac{1}{2b} \left( b - \frac{\chi}{3\mu\tau} [a^3 - (a-b)^3] + \frac{\chi^2}{4\tau} BE [a^4 - (a-b)^4] \right). \tag{5}$$

Вираз для  $h_{21B1}$  відрізняється лише зміною знака перед доданком з  $B$ . Формула (5) враховує тільки зміну ефективної довжини бази магніотранзистора. Як видно з рис. , г, дія ефекту перерозподілу носіїв між колекторами полягає в тому, що носії, інжектовані з частини емітера  $0 - b_1$ , під час відсутності магнітного поля попадають у колектор K2, а під дією магнітного поля відхиляються у бік K. Це еквівалентно тому, що в

магнітному полі значення  $a$  і  $b$  з боку К збільшилися на величину  $b_1$ . У малих магнітних полях

$$b_1 \approx W_0 \sin \varphi \approx h \mu B = a^2 \chi E \mu B.$$

Відповідно в (5) необхідно у фігурній дужці замінити  $a$  і  $b$  на  $a + b_1$  і  $b + b_1$ .

У реальних схемах вихідним параметром є напруга між колекторами  $U = R_H (I_{K1} - I_{K2}) = R_H I_E (h_{21B1} - h_{21B2})$ . Із виразу (5) маємо [1]

$$h_{21B1} - h_{21B2} = [\chi^2 BE / (4b\tau)] [a^4 - (a - b)^4]. \tag{6}$$

Аналіз отриманого виразу демонструє, що в слабких магнітних полях основний внесок у магніточутливість дає зміна ефективної довжини бази. З метою збільшення чутливості в структуру двоколекторного магнітотранзистора можна ввести додатковий базовий контакт (Б2 на рис. 1, в). При проходженні струму основних носіїв через базові електроди Б2 і Б у базі виникає ЕРС Холла, що спрямована так, що відхиляє інжектовані носії у ту ж сторону, що і сила Лоренца. Отже, перерозподіл інжектованих носіїв між колекторами збільшується. Крім того, прикладена до контактів Б2 і Б напруга збільшує напруженість електричного поля в базі, що приводить до збільшення швидкості руху інжектованих носіїв, а відповідно і сили Лоренца [3].

На рис. 2 зображена типова залежність напруги між колекторами від індукції магнітного поля для планарного магнітотранзистора, структура якого зображена на рис. 1, в. [2]

Відповідно до принципу дії біполярного транзистора включення контакту Б2 еквівалентно шунтуванню емітерного  $p-n$  переходу і зменшенню струму через нього. Проте, як видно з рис. 2, магніточутливість збільшується, що пояснюється збільшенням напруженості електричного поля в базі і ЕРС Холла. При однакових робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вище чутливості сенсорів Холла. Збільшена чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси і тощо). При цьому в значних магнітних полях чутливість зменшується тому, що всі носії вже перерозподілені, і напруга збільшується виключно через зменшення ефективної довжини бази [2].

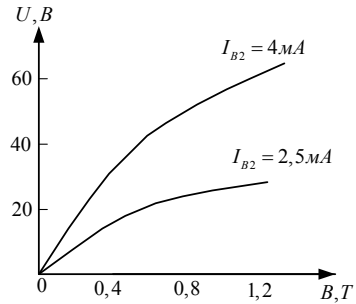


Рис. 2. Залежність напруги між колекторами магнітотранзистора від магнітної індукції для різних струмів бази при  $I_{B2} + I_E = 5$  мА.

### Розробка радіовимірювального перетворювача магнітного поля

Розроблено структурну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом (рис. 3), яка складається з двоколекторного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів.

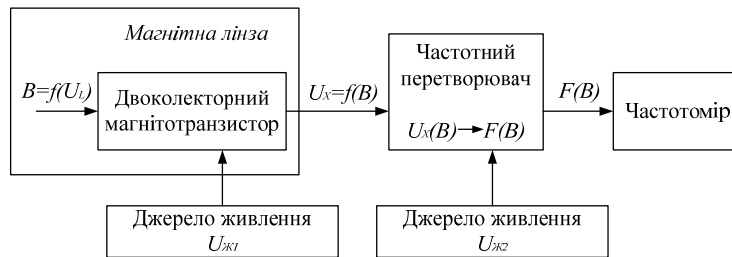


Рис. 3. Структурна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

Електрична схема розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання напруженості магнітного поля наведено на рис. 4.

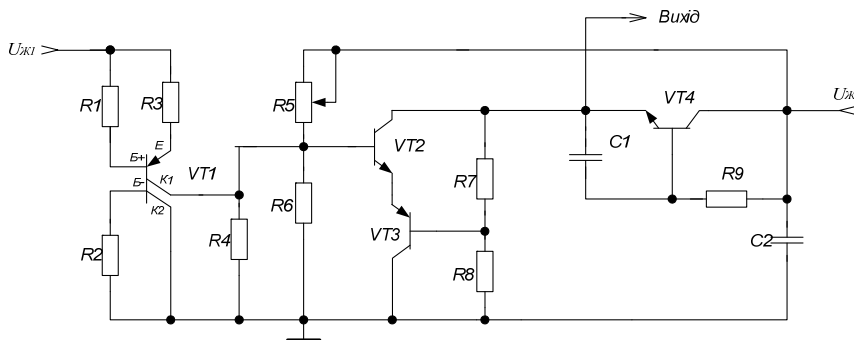


Рис. 4. Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

В якості датчика магнітного поля використовується ДКБМТ  $VT1$ . Транзистори  $VT2, VT3, VT4$

виконані за інтегральною технологією і представлені мікросхемою HFA4094.

Основою пристрою є автогенератор, утворений транзисторною структурою VT2, VT3 та активною індуктивністю (VT4, C1, R9). Резистори R5-R8 забезпечують розміщення робочої точки транзисторів (на спадній ділянці ВАХ транзисторної структури). Двоколекторний магнітотранзистор ввімкнено в схему перетворювача паралельно до транзисторної структури з від'ємним опором [4].

Принцип роботи радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним вихідним сигналом базується на зміні частоти генерації перетворювача в залежності від зміни рівня інформативного сигналу (який залежить від напруженості вимірюваного магнітного поля) з двоколекторного магнітотранзистора. Чим вища напруженість магнітного поля, тим більша зміна частоти генерації вихідного коливання у радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом [5].

### Експериментальне дослідження радіовимірювального магнітного перетворювача

За результатами експериментальних досліджень було побудовано (функції перетворення) графіки залежності частоти генерації від напруженості магнітного поля рис. 5 при різних напругах керування

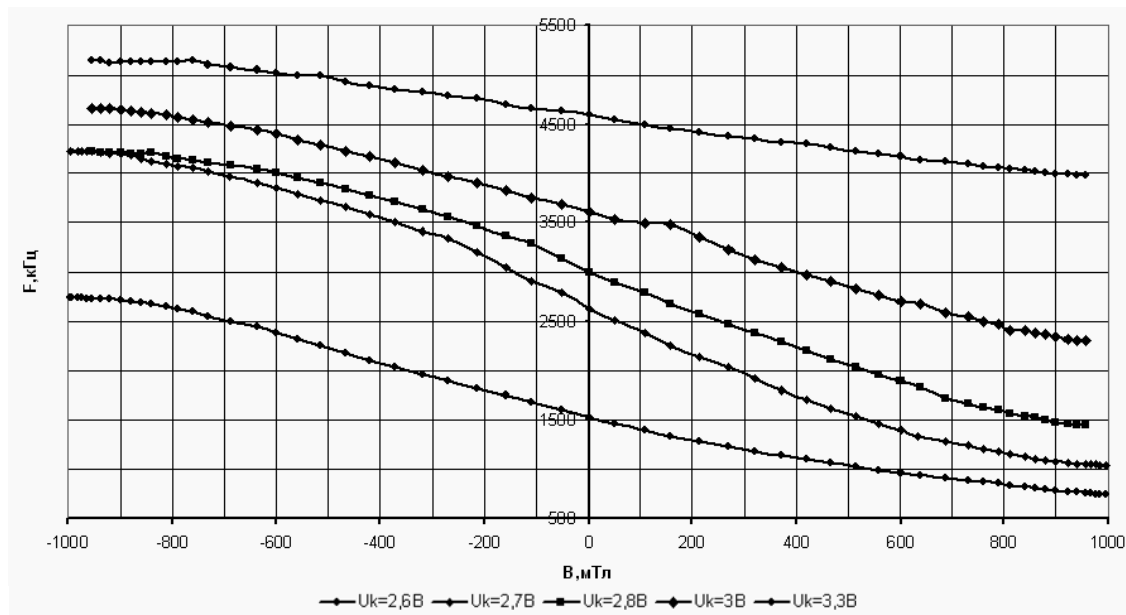


Рис. 5. Залежність частоти генерації радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

При зростанні напруги керування зростає частота генерації при відсутності магнітного поля (діє лише магнітне поле Землі). При напрузі керування  $U_K = 2,6 В$  чутливість приладу в області дії від'ємного магнітного поля більша ніж при дії додатного магнітного поля. Подальше збільшення напруги керування до 2,8 В сприяє збільшенню чутливості радіовимірювального перетворювача. І при напрузі керування  $U_K = 2,8 В$  спостерігаємо найбільшу чутливість радіовимірювального перетворювача до дії магнітного поля. Також при цій напрузі керування чутливість як до дії додатного так і від'ємного магнітного поля є майже однаковою. При подальшому збільшенні напруги керування, чутливість радіовимірювального перетворювача до магнітного поля (як додатного так і від'ємного) зменшується, але зростає нульова (при відсутності магнітного поля) частота вимірювання. І як видно з графіків найбільша чутливість (досягається) при напрузі керування  $U_K = 2,8 В$  спостерігається до магнітного поля яке змінюється в межах:  $-700 мТл \dots +700 мТл$ .

Використовуючи експериментальні табличні дані та програми TableCurve2D визначено аналітичний опис функції перетворення радіовимірювального перетворювача.

Найбільш оптимальною є функція перетворення яка має наступний вигляд

$$F(B) = a + \frac{b}{\left[ 1 + \exp\left( \frac{-B - d * \ln(2^{1/g} - 1) - c}{d} \right) \right]^2}, \quad (7)$$

де невідомі коефіцієнти мають наступні величини:  $a=4334,78$ ;  $b=-3483,43$ ;  $c=206,856$ ;  $d= 540,374$ ;  $g=2,374$ .

Використовуючи програму TableCurve2D було встановлено, що відносна похибка функції перетворення становить  $\pm 0,5\%$ .

За результатами експериментальних досліджень побудовано графік залежності чутливості радіовимірювального перетворювача  $S(B) = \left| \frac{d(F(B))}{dB} \right|$  від напруженості магнітного поля при напрузі

керування  $U_K = 2,8B$  (рис. 6).

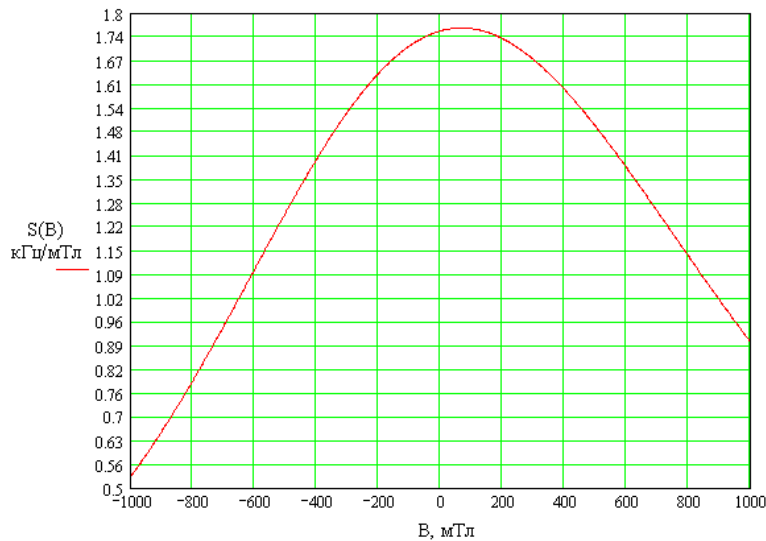


Рис. 6. Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

Графік чутливості радіовимірювального перетворювача (рис. 6) має різну крутість для додатного та від'ємного магнітних полів. Наприклад, для напруженості магнітного поля  $B=-1000$  мТл чутливість становить близько  $S=0,53$  кГц/мТл, а при напруженості магнітного поля  $B=1000$  мТл чутливість становить близько  $S=0,90$  кГц/мТл. Це пов'язано з тим, що в магнітотранзисторі що використовується, основними носіями є дірки. А при зміні полярності магнітного поля починають електрони (яких менше і які є неосновними носіями) помітно впливати на вихідну напругу датчика. Найбільша чутливість спостерігається в діапазоні додатного магнітного поля, напруженість якого змінюється в межах 20–100 мТл.

#### Висновки

В статті досліджено виникнення інформативних сигналів у двоколекторному магнітотранзисторі під час впливу на нього магнітного поля. Розроблено структурну та електричну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

Експериментально встановлено, що максимальна чутливість радіовимірювального перетворювача становить 1,76 кГц/мТл. При цьому, відносна похибка перетворювача не перевищує  $\pm 0,5\%$ . При зміні напруженості магнітного поля в діапазоні -700 мТл ... 700 мТл досягнуто зміни частоти вихідного сигналу в діапазоні 1700 кГц ... 4000 кГц. Таким чином, значна зміна вихідної частоти радіовимірювального перетворювача дозволить точніше вимірювати напруженість магнітного поля досліджуванім перетворювачем.

#### Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 3. / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом : [монографія.] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 254 с.
3. Igor V. Minin. Microsensors / Igor V. Minin, Oleg V. Minin – India, Croatia: InTech, 2011. 306 p.
4. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
5. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : [монографія.] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, А.О. Семенов, К.О. Коваль. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 336 с.

#### References

1. Gotra Z.U. Microelectronni sensory fizychnykh velychyn: v 3 t. T.3 / Z.U. Gotra – Lviv: Liga-Pres, 2002. – 475 p.
2. Osadchuk V.S. Microelectronic sensors magnetic field with frequency output [Monograph.]. V.S. Osadchuk, O.V. Osadchuk - Vinnytsia: VNTU, 2013. - 254 p.
3. Igor V. Minin. Microsensors / . Igor V. Minin, Oleg V. Minin – India, Croatia: InTech, 2011. - 306 p.
4. Osadchuk O.V. Microelectronic frequency converters based on transistor structures with negative resistance / O.V. Osadchuk - Vinnytsia: Universum, Vinnytsia, 2000. - 302 p.
5. Osadchuk V. S. Functional units of radio devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: [Monograph.] / O.V. Osadchuk, A.O. Semenov, K.O. Koval - Vinnytsia: VNTU, 2011. - 336 p.

Рецензія/Peer review : 12.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д. т. н., проф. Кичак В. М.

УДК 621.384.326

А.О. КИЯНИЦЯ, В.В. ІВАНОВА, В.Г. КОЛОБРОДОВ  
Національний технічний університет України «КПІ»

## УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОЇ МАТРИЦІ ТА ОБ'ЄКТИВА ТЕПЛОВІЗОРА

В статті досліджувався вплив параметрів матриці та об'єктива на характеристики тепловізійної системи, такі як температурна чутливість і просторове розділення. За узагальнюючий критерій оцінки такого впливу було обрано відношення частот зрізу модуляційних передавальних функцій об'єктива та матричного теплового приймача випромінювання. Визначені області значень критерію, в межах яких роздільна здатність системи обмежується або об'єктивом, або матрицею. Отримані результати дають можливість обґрунтувати вибір діафрагмового числа об'єктива та розміру пікселя матриці, виходячи з заданої еквівалентної шуму різниці температур та необхідного просторового розділення.

Ключові слова: тепловізор, піроелектрична матриця, модуляційна передавальна функція, еквівалентна шуму різниця температур, роздільна здатність, діафрагмове число, піксель.

A.O. KYIANYTSIA, V.V. IVANOVA, V.G. KOLOBRODOV  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

### MATCHING OF PYROELECTRIC UNCOOLED FOCAL PLANE ARRAY AND LENS OF AN INFRARED IMAGER

*Abstract – the paper considers the uncooled focal plane array and lens parameters influence on infrared imaging systems characteristics such as temperature sensitivity and spatial resolution. Ratio of cut-off frequencies of detector and lens modulation transfer functions was chosen as a general criterion for this influence assessment. Criterion values within which the resolution is limited either lens or detector were obtained. The results make it possible to justify the choice of F-number and pixel size based on a given noise equivalent temperature difference and the required spatial resolution.*

*Keywords: infrared image, pyroelectric UFPA, modulation transfer function, NETD, spatial resolution, F-number, pixel.*

### Вступ

Сьогодні особливо гостро постало питання розробки недорогих оглядових тепловізорів (ТПВ), призначених для виявлення та розпізнавання об'єктів на місцевості. Такими ТПВ є малогабаритні системи низького енергоспоживання без охолодження, в яких застосовують теплові детектори UFPA (*Uncooled Focal Plane Array*) у вигляді матриць мікроболометрів та піроелектричних матриць (ПМ). За останні роки значно виріс випуск та номенклатура мікроболометричних матриць, причому останні досягнення зосереджені на зменшенні розміру пікселя до 12 мкм [1]. З ряду технічних причин розробка і випуск піроелектричних матриць дещо сповільнилась. Відомі зразки ПМ мають найменший розмір пікселя 37 мкм, до того ж доцільність концентрації зусиль на зменшенні пікселя досліджувалась недостатньо. Серед недоліків реальних ТПВ на піроматрицях зазначають недостатню температурну чутливість та роздільну здатність. Тому важливим питанням є аналіз впливу розміру пікселя матриці на характеристики ТПВ та обґрунтування доцільності подальших розробок з огляду на принципові переваги піроелектричних матриць над мікроболометричними.

### Постановка задачі

Метою статті є дослідження впливу розміру пікселя піроелектричної матриці та параметрів об'єктива на характеристики тепловізійної системи, зокрема, на температурну чутливість і просторове розділення.

### Температурна чутливість

Порівняльний аналіз розробок UFPA показує, що тепловізори на піроелектричних матрицях мають ряд переваг, обумовлених особливостями матеріалу датчика, в якому використовується піроелектричний ефект, тобто зміна спонтанної поляризації пластини або плівки піроелектрика при зміні температури. Піроелектрична матриця – пасивний тип детектора, який не потребує напруги зміщення, а відсутність струму в чутливому шарі обумовлює відсутність шумової складової  $1/f$ , яка суттєва у мікроболометрах. Еквівалентна шуму різниця температур NETD, обмежена тільки флуктуаціями температури, і тому є мінімальною і визначається спектральним діапазоном роботи та розміром пікселя матриці. Так як піроелектричні детектори реагують тільки на зміну температури в часі, то вони не є чутливими до фонових випромінювань, зменшуються також вимоги до однорідності чутливості елементів матриці. Завдяки цьому знижується фіксований геометричний шум, який визначає реальні значення мінімальної роздільної різниці температур MRTD.

Для оцінки граничних параметрів пасивних тепловізійних систем використовується саме параметр NETD, а не питома виявлена здатність  $D^*$ . NETD досягає фундаментальної фізичної межі для ідеального теплового детектора, який знаходиться в тепловій рівновазі з оточуючим середовищем. Для такого детектора параметр  $D^*$  обмежується тільки випадковими коливаннями температури внаслідок флуктуацій падаючого випромінювання, не залежить від площі чутливого елемента і для температури оточуючого середовища. Наприклад, для температури об'єкта  $T=300$  К маємо  $D^* = 1,813 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \sqrt{\text{Гц/Вт}}$  [2].

За відсутності втрат в атмосфері та складових системи, в умовах тільки радіаційного обміну з

оточуючим середовищем гранично можливі значення *NETD* визначаються як [3]:

$$NETD = \frac{4F^2}{D^* \sqrt{(\lambda/\tau_d)^2 + (\lambda/\tau_d)^2} \cdot \left( \frac{A_d}{A_d} \right)^2 \cdot \left( \frac{dM_{\lambda}}{dT} \right)^2} \quad (1)$$

де *F* – ефективне діафрагмове число об’єктива;  $\tau_d$  – час інтегрування сигналу, тобто час опромінення пікселя ПМ; *A<sub>d</sub>* – площа пікселя;  $\frac{dM_{\lambda}}{dT}$  – диференціальна спектральна енергетична світність АЧТ.

В спектральному інтервалі 8÷14 мкм інтеграл в (1) дорівнює  $2.63 \cdot 10^{-4} \frac{Вт}{см^2 \cdot К}$  [3]. Для ідеальної матриці з розміром пікселя 50x50 мкм<sup>2</sup>,  $D^* = 1.813 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \sqrt{\text{Гц/Вт}}$ , з часом розкладу зображення 20 мс отримаємо NETD=0,84 мК. Відповідно зменшення розміру пікселя до дифракційної межі 25x25 мкм<sup>2</sup> приведе до збільшення вдвічі NETD=1,68 мК.

Реальні ТПВ мають значно гірші показники через наявність внутрішніх шумів матриці, шумів схем зчитування і т.п. Наприклад, компанія Raytheon Commercial Infrared (США) заявляє для піроелектричної матриці, яка має 320x240 елементів, з розміром пікселя 50 мкм, NETD = 80 мК; для матриці (384x288 та 512x256) з розміром пікселя 40 мкм виробництва BAE Systems, Infrared Limited (Велика Британія) – NETD = 60-140 мК; для матриці (320x240) з розміром пікселя 37 мкм виробництва NEC (Японія) – NETD = 34-67 мК.

Очевидно, що зменшення розміру пікселя від 50 мкм до 25 мкм збільшить NETD до 160 мК. З іншого боку зменшення розміру пікселя покращує роздільну здатність матриці, яка найкращим чином характеризується модуляційною передавальною функцією (МПФ). Так як МПФ тепловізора визначається добутком МПФ складових системи, і припустивши МПФ електронного блоку і дисплея рівними одиниці для всього діапазону можливих значень просторової частоти, необхідним залишається врахування спотворення зображення, які вносять об’єктив та матриця ТПВ.

Питання узгодження параметрів останніх з точки зору роздільної здатності системи залишаються актуальними. Критерії узгодження МПФ об’єктива і матричного приймача розглядалися в роботі [4]. Однак, розглянуті критерії є частковими. В роботі [5, 6] запропонований узагальнюючий критерій  $\frac{F\lambda}{V_d}$ , де *V<sub>d</sub>* – розмір пікселя. Аналіз даного критерія для обґрунтування вибору взаємопов’язаних параметрів об’єктива і матричного приймача є предметом даної статті. Крім того, вважаємо за доцільне пов’язати температурну чутливість і роздільну здатність, застосовуючи цей критерій.

**Критерій оцінки роздільної здатності ТПВ**

Нехай МПФ тепловізора визначається як

$$M_z(v_x) = M_o(v_x)M_d(v_x), \quad (2)$$

де  $M_o(v_x)$  – МПФ об’єктива,  $M_d(v_x)$  – МПФ матриці детекторів.

Вважаючи об’єктив безабераційним дифракційно обмеженим, а матрицю, складеною з квадратних пікселів з кроком *V<sub>d</sub>*, приймемо згідно з [3]:

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cdot (\cos^{-1}(F\lambda v_x) - (F\lambda v_x) \sqrt{1 - (F\lambda v_x)^2}), & \text{якщо } 0 \leq v_x \leq \frac{1}{F\lambda} \\ 0, & \text{якщо } v_x \geq \frac{1}{F\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

$$M_d(v_x) = \frac{\sin(\pi V_d v_x)}{\pi V_d v_x} \quad (4)$$

де *F* – діафрагмове число об’єктива.

З (3) і (4) видно, що гранична просторова частота зрізу МПФ дифракційно обмеженого об’єктива дорівнює  $\frac{1}{F\lambda}$ , а гранична частота зрізу ідеальної матриці дорівнює  $\frac{1}{V_d}$ . Тому оцінку впливу кожної складової на результуючу МПФ часто оцінюють за критерієм  $\frac{F\lambda}{V_d}$  [4]. Показано, що залежно від даного відношення граничних частот зрізу об’єктива і детектора можна виділити області, де обмеження роздільної здатності системи обумовлено переважно однією із складових. Ці області названо областю домінування об’єктива і областю домінування детектора [4].

Рис.1 ілюструє МПФ системи у двох випадках. У першому – частота зрізу об’єктива нижче частоти зрізу детектора  $1/F\lambda < 1/V_d$ , в результаті гранична частота МПФ системи визначається об’єктивом. У другому випадку  $1/V_d < 1/F\lambda$ , тобто обмеження роздільної здатності системи зумовлено детектором.

Оцінимо та узагальнимо вплив кожної з складових на МПФ системи. Очевидно, що збільшення діафрагмового числа погіршує МПФ об’єктива, так як частота зрізу визначається як  $1/F\lambda$ . Пов’язуючи діаметр плями розсіювання об’єктива з розміром пікселя, прирівняємо діаметр кружка Ері до *V<sub>d</sub>* :  $2\tau_E = 2.44\lambda F = V_d$ . Отримаємо  $\frac{F\lambda}{V_d} = 0.41$ . Менші значення критерію визначатимуть область невиправдано високого розділення оптики для даної матриці. Це область обмеження детектора. Використавши значення частоти Найквіста  $v_N = \frac{1}{2V_d}$  як граничної для об’єктива, отримаємо  $\frac{F\lambda}{V_d} = 2$ . При цьому пляма розсіювання об’єктива перевищуватиме розмір пікселя в 4,88 разу. Ситуація, коли граничні просторові частоти зрізу об’єктива і матриці співпадають, тобто критерій  $\frac{F\lambda}{V_d} = 1$  ( при цьому  $2\tau_E = 2.44V_d$  ), розмежовує області домінування об’єктива і детектора, як показано на рис. 2, де наведені МПФ детектора та МПФ системи



об'єктив-матриця для проаналізованих вище значень обраного критерію. На рис. 2 позначена область А – домінування детектора, тобто роздільна здатність обмежується розміром пікселя; В – область домінування об'єктива, роздільна здатність системи обмежується роздільною здатністю оптичної системи.

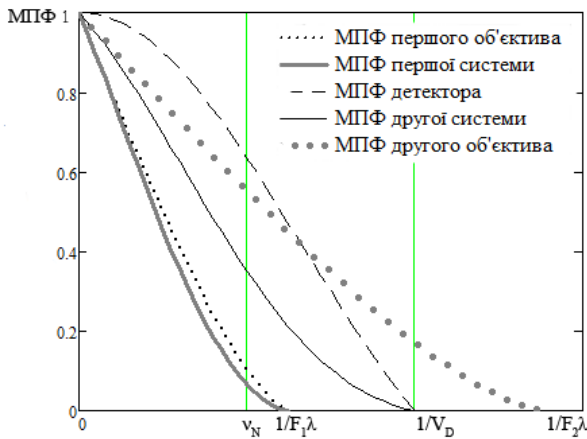


Рис.1. МПФ двох систем і МПФ відповідних їм об'єктів та детектора для різних частот зрізу:  $1/F_1 \lambda < 1/V_d < 1/F_2 \lambda$ ;  $\nu_N$  – частота Найквіста

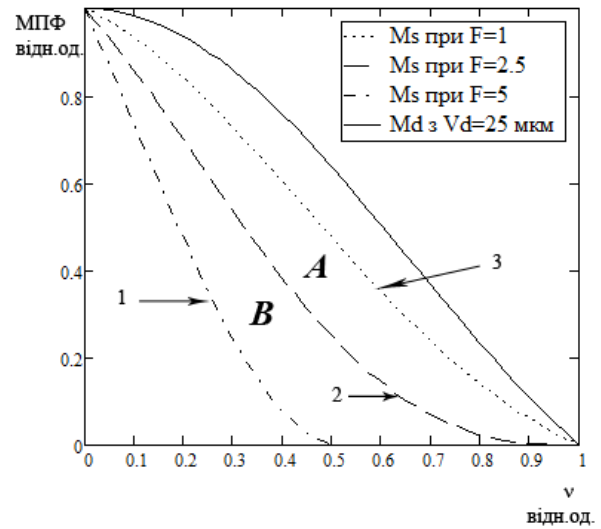


Рис.2. МПФ детектора ( $V_d=25$  мкм) та МПФ системи для граничних значень критерію: 1 - для  $\frac{F\lambda}{V_d} = 2$ ; 2 - для  $\frac{F\lambda}{V_d} = 1$ ; 3 - для  $\frac{F\lambda}{V_d} = 0,41$ ; А – область домінування детектора; В – область домінування об'єктива; просторова частота  $\nu$  подана відносно частоти зрізу детектора  $\frac{1}{V_d}$ .

З огляду на викладене видається корисним оцінити можливі співвідношення між значеннями діафрагмового числа та розміру пікселя матриці. Результати відповідних розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення діафрагмового числа в залежності від критерія  $\frac{F\lambda}{V_d}$  при різних значеннях розміру пікселя

$V_d$ мкм	$\frac{F\lambda}{V_d}$	Область домінування детектора				1,0	Область домінування об'єктива				
		0,41	0,5	0,6	0,75		1,1	1,2	1,5	1,75	2,0
70	2,87	3,5	4,2	5,25	7	7,7	8,4	10,5	12,25	14	
50	2,05	2,5	3	3,75	5	5,5	6	7,5	8,75	10	
40	1,64	2	2,4	3	4	4,4	4,8	6	7	8	
35	1,43	1,75	2,1	2,62	3,5	3,85	4,2	5,25	6,12	7	
30	1,23	1,5	1,8	2,25	3	3,3	3,6	4,5	5,25	6	
25	1,02	1,25	1,5	1,87	2,5	2,75	3	3,75	4,37	5	
20	0,82	1	1,2	1,5	2	2,2	2,4	3	3,5	4	
15	0,61	0,75	0,9	1,12	1,5	1,65	1,8	2,25	2,62	3	
10	0,41	0,5	0,6	0,75	1	1,1	1,2	1,5	1,75	2	
5	0,21	0,25	0,3	0,38	0,5	0,55	0,6	0,75	0,88	1	

В табл. 1 виділені області, в яких значення діафрагмового числа менше 1,0 (нижня не заштрихована область), досягає 2,0 (діагонально заштрихована область), не досягає 3,0 (горизонтально заштрихована область). В межах лівого прямокутника – зона домінування детектора, правого – зона домінування об'єктива, коли роздільна здатність тепловізійної системи обмежена дифракцією на об'єктиві. Для реальних об'єктів, які застосовуються в тепловізорах, мінімальне значення діафрагмового числа  $F=1,0$ . Для цього значення на абсолютній межі розділення  $\frac{F\lambda}{V_d} = 2$  з табл. 1 визначаємо, що мінімальний корисний розмір пікселя становить 5 мкм. При цьому діаметр кружка Ейрі становитиме  $2r_E = 24,4$  мкм.

В межах нижньої незаштрихованої частини області домінування детектора в табл. 1 дифракційна пляма сумірна з кроком матриці, але вимагає практично неприйнятних значень діафрагмового числа, що потрібно брати до уваги при проектуванні ТПВ.

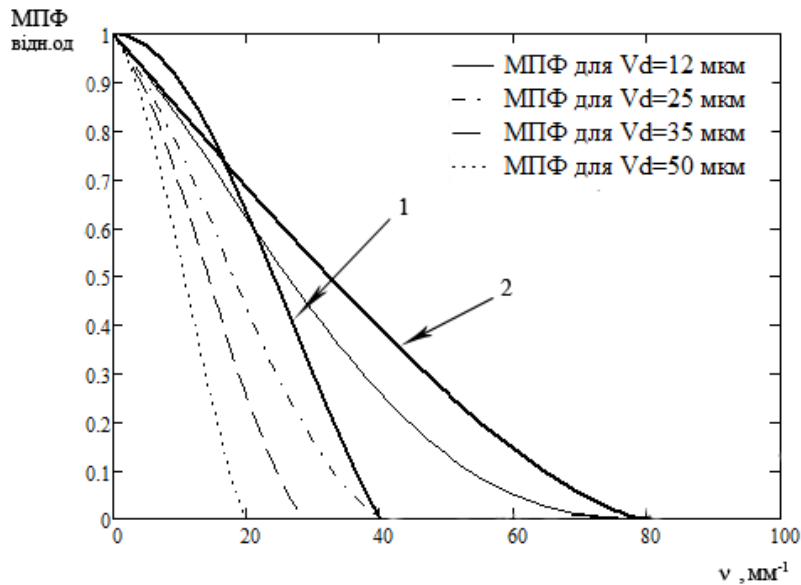


Рис.3. МПФ системи для чотирьох розмірів пікселя, діафрагмове число  $F=1,25$ ; 1 - МПФ матриці з пікселем  $V_d=25$ мкм; 2 - МПФ об'єктива з  $F=1,25$

Графіки на рис. 3 демонструють, що при  $F=1,25$  з матрицею з пікселем 12,5 мкм роздільна здатність обмежується частотою зрізу об'єктива, тобто МПФ ТПВ знаходиться в області домінування об'єктива. Для ПМ з більшими пікселями обмеження роздільної здатності зумовлено матрицею.

Згідно з [4] в якості критерію узгодження роздільної здатності запропоновано критерій рівності МПФ об'єктива і детектора на частоті Найквіста  $\nu_N$ , що для дифракційно обмеженого об'єктива дає  $V_D=16,78 \cdot F$ , що для  $\lambda=10$  мкм визначає  $\frac{F\lambda}{V_d} = 0,6$ , тобто потрапляння в зону домінування детектора. При цьому розмір кружка Ері в 1,5 рази перевищує крок матриці.

Показана на рис.4 залежність між  $F$  і  $V_d$ , демонструє можливі варіанти комбінацій між цими параметрами, які забезпечують однакове значення критерію, та однакові значення  $NETD$ .

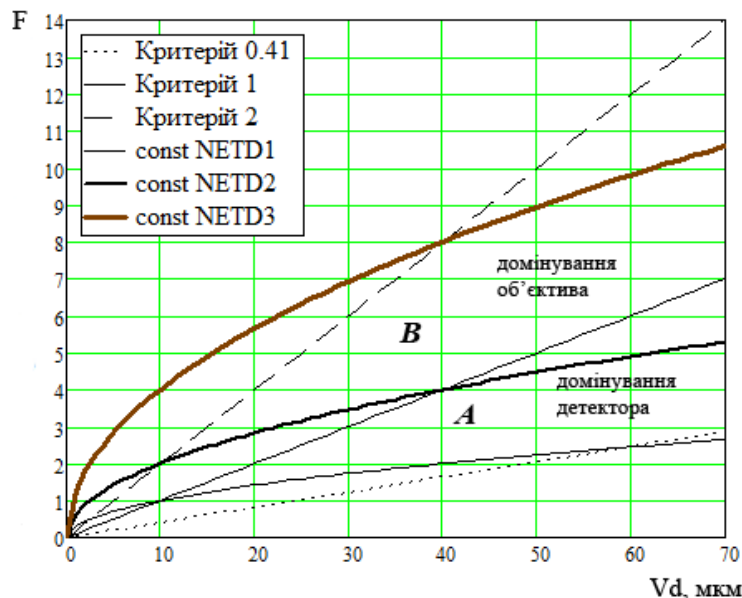


Рис. 4. Залежність  $F$  від  $V_d$ . Прямі постійних значень критерію  $F\lambda/V_d=0,41; 1,0; 2,0$  та криві постійних  $NETD1- NETD3$ , пропорційних  $F^2\lambda/V_d=1, 4$  та  $16$  відповідно

Так як  $NETD$  залежить квадратично від діафрагмового числа та лінійно від величини, оберненої до розміру пікселя, лінія постійного значення  $NETD$  не є прямою, а для  $NETD$  суттєвішими є зміни діафрагмового числа, ніж кратні зміни розміру пікселя при збереженні постійного значення критерію  $F\lambda/V_d$ . Точка перетину кривої постійного значення  $NETD$  з обраною, згідно з вимогами застосування ТПВ, прямою постійного значення критерію дасть оптимальні значення  $F$  і  $V_d$ .

Отримані результати дають можливість обґрунтовувати вибір взаємозалежних параметрів об'єктива і матриці ( $F$  і  $V_d$ ). Це дозволить при задаванні необхідного  $NETD$  (в межах  $F^2\lambda/V_d = const$ ) для матриці з заданим розміром пікселя визначити обґрунтовані параметри об'єктива (діафрагмове число, поле зору, масо-

габаритні характеристики і, зрештою, вартість).

В неохолоджуваних ТПВ зазвичай застосовують об'єктиви з  $F$  між 1,0 і 1,4. В залежності від практичних потреб пріоритетність просторового розділення по відношенню до  $NETD$  вимагає кращої МПФ, яка в свою чергу висуває вимоги до зменшення  $F$  та  $V_d$ . Але з позиції зменшення та здешевлення оптичної системи потрібно збільшувати діафрагмове число. Наведені розрахунки висвітлюють ряд ключових моментів для визначення найменшого практично прийняттого розміру пікселя для  $FPA$ . Мотивом для зменшення розміру пікселя є отримання меншого і легшого об'єктива при заданих незмінних полі зору і виправданій  $NETD$ .

### Висновки

Застосований до тепловізійної системи простий узагальнюючий критерій  $F\lambda/V_d$  дає змогу узгодити параметри об'єктива і приймальної матриці як з точки зору зіставлення їх роздільних здатностей, так і з урахуванням температурної чутливості.

Показано, що практично доцільні значення цього критерію лежать у межах  $0,41 \div 2,0$ . При цьому будь-які реальні комбінації діафрагмового числа об'єктива і розміру пікселя приймальної матриці, які дають значення  $0,41 \leq F\lambda/V_d < 1,0$  визначають область домінування детектора, в якій роздільна здатність системи обмежується розміром пікселя. Якщо ж  $1,0 \leq F\lambda/V_d < 2,0$  то це область домінування об'єктива, де роздільна здатність обмежується дифракцією.

Отримані результати дають можливість досягнути компромісу, зробивши оптимальний вибір взаємозалежних параметрів  $F$  і  $V_d$  при заданій  $NETD$ .

### Література

1. Becker S., Imperinetti P., Yon J.J., Ouvrier-Buffet J.-L., Goudon V., Hamelin A., Vialle C., Arnaud A. Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI. Proc. SPIE. 2014. 8541. P.85410C-1-7.
2. Сизов Ф.Ф. Фотоелектроника для систем видення в «невидимих» участках спектра / Сизов Ф.Ф. – К. : Академперіодика, 2008. – 460 с.
3. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження : підручник / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. — К. : НТУУ “КПІ”, 2007. — 364 с.
4. Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві. Узгодження роздільної здатності об'єктива і матричного приймача випромінювання медичного тепловізора / Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві, Є.Г. Балінський, В.Г. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 1. – С. 117–120.
5. Lohrmann Littleton D.R., Reese C., Murphy D., Vizgaitis J. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges/ Optical Engineering. 2013. V. 52(6). P. 061305-1-6.
6. Holst C., Driggers G. Small detectors in infrared system design. Optical Engineering. 2012. № 51(9). P.096401-1-10.

### References

1. Becker S., Imperinetti P., Yon J.J., Ouvrier-Buffet J.-L., Goudon V., Hamelin A., Vialle C and Arnaud A. "Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI", Proc. SPIE., 2014, 8541, pp.85410C-1-7.
2. Sizov F.F., "Fotoelektronika dlya system videniya v "nevidimykh" uchastkakh spectra", Kiev, Ukraine, Akademperiodika, 2008, 460 p.
3. Kolobrodov V.H., Lykholit M.I., "Proektuvannia teploviziynykh i televiziynykh system sposterezheniia", Kiev, Ukraine, NTUU "KPI", 2007, 364p.
4. Akhmed Malik Lazim Al'-Mziravi, Balins'kyi Ye.G., Kolobrodov V.H. "Uzhodzhennia rozdilnoyi zdatnosti ob'yektyva i matrychnogo pryimacha vypyrominiuvannia medychnogo teplovizora", Naukovi visti NTUU "KPI", 2012, 1, pp.117-120.
5. Lohrmann D., Littleton R., Reese C., Murphy D, Vizgaitis J., "Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges" Optical Engineering, 2013, 52(6), pp.061305-1-6.
6. Holst C., Driggers G. "Small detectors in infrared system design", Optical Engineering, 2012, 51(9), pp.096401-1-10.

Рецензія/Peer review : 5.2.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор Воронов С. О.

## OPTIMAL PIXEL-TO-TURN-SCALE STANDARD DEVIATIONS RATIO FOR TRAINING 2-LAYER PERCEPTRON ON TURNED-SCALED OBJECTS WITH DISTRIBUTION-CONSISTENT FEATURE DISTORTION IN CLASSIFYING TURNED-SCALED OBJECTS

*There is studied a problem of turned-scaled objects classification. The object model is the letter of English alphabet, which is monochrome 60-by-80-image. The classifier is 2-layer perceptron trained on turned-scaled images with normally distributed pixel distortion. The relationship among turning-scaling distortion intensities and pixel distortion intensity is regulated by pixel-to-turn-scale standard deviations ratio. For decreasing classification error percentage, the ratio is optimized. The optimal ratio is evaluated as the segment as well, where a graph of classification error percentage function has a cavity. The best-trained-under-the-optimal-ratio classifier makes errors no greater than 1.004 %.*

*Keywords: automatization, turned-scaled objects, object classification, neocognitron, perceptron, monochrome images, pixel distortion, turning distortion intensity, scaling distortion intensity, training set, pixel-to-turn-scale standard deviations ratio, classification error percentage.*

V. V. РОМАНЮК  
Хмельницький національний університет

### ОПТИМАЛЬНЕ ВІДНОШЕННЯ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНИХ ВІДХИЛЕНЬ ПІКСЕЛЬНИХ СПОТВОРЕНЬ І СПОТВОРЕНЬ ПОВОРОТАМИ ТА МАСШТАБУВАННЯМ ДЛЯ НАВЧАННЯ 2-ШАРОВОГО ПЕРСЕПТРОНА НА ПОВЕРНУТИХ І МАСШТАБОВАНИХ ОБ'ЄКТАХ З УЗГОДЖЕНИМИ ЗА РОЗПОДІЛОМ СПОТВОРЕННЯМИ ОЗНАК У КЛАСИФІКАЦІЇ ПОВЕРНУТИХ І МАСШТАБОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Досліджується задача класифікації повернутих і масштабованих об'єктів. Моделлю об'єкта виступає літера англійського алфавіту, котра представляє собою монохромне зображення формату 60 на 80. Класифікатором є 2-шаровий перцептрон, що навчається на повернутих і масштабованих зображеннях з нормально розподіленими піксельними спотвореннями. Співвідношення між інтенсивностями спотворень поворотів і масштабування та інтенсивністю піксельних спотворень регулюється відношенням середньоквадратичних відхилень піксельних спотворень і спотворень поворотами та масштабуванням. Для зменшення відсоткового рівня помилок це відношення оптимізується. Оптимальне відношення оцінюється також як і відрізок, де графік відсоткового рівня помилок має западину. Найкращий класифікатор, навчений за оптимального відношення, робить помилки, що не перевищують 1.004 %.*

*Ключові слова: автоматизація, повернуті і масштабовані об'єкти, класифікація об'єктів, неокогнітрон, перцептрон, монохромні зображення, піксельні спотворення, інтенсивність спотворень поворотами, інтенсивність спотворень масштабуванням, навчальна вибірка, відношення середньоквадратичних відхилень піксельних спотворень і спотворень поворотами та масштабуванням, відсотковий рівень помилок.*

#### Problem of classification under distribution-inconsistency in object distortions

Nowadays is tightly connected with swift information flow. A huge part in this flow is automatization systems functioning, built on computer vision technique. After being detected and tracked, the object has to be classified to one of  $N_{\text{class}} \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$  classes [1]. The classification fundamental [1, 2] is in describing the object as an

$N$ -dimensional real-valued matrix  $\mathbf{B} = [b_j]_{\mathcal{L}}$  of the format  $\mathcal{L} = \prod_{d=1}^N L_d$  and subscript  $J$ , having  $L_d$  features in its  $d$ -th dimension. Certainly, for flat objects  $N \geq 2$ , for solids  $N \geq 3$ , and solids in motions always are presented in

four or more dimensions. If total number of object features  $\prod_{d=1}^N L_d$  and integer  $N_{\text{class}}$  aren't great (not greater than

10, roughly), mostly classifiers are based on using the principle of minimizing the distance between the tracked object and  $N_{\text{class}}$  pattern objects (PO), or on feature-by-feature comparisons between the tracked object and  $N_{\text{class}}$  PO, or on decision trees [3, 4]. For objects with great number of features (tens, hundreds or even thousands) the neural network approximators are needed [5].

Multilayer perceptron performance is magnificent when the object at the perceptron classifier input, which naturally differs from those  $N_{\text{class}}$  PO, can be presented as one of the patterned objects, distorted in a part of its

$\prod_{d=1}^N L_d$  features, and this feature distortion is statistically distribution-consistent. Unfortunately, these distribution-consistent feature distortions (DCFD) occur rarely. In real-time flow tracking or monitoring, the  $N$ -dimensional object by  $N \in \{1, 2, 3\}$  may appear rotated (turned at a plane or space-solid angle), scaled (linearly and non-linearly), shifted towards each of  $N$  dimensions, mirrored to left or right along each of  $N$  dimensions, and so on. Such distribution-inconsistent feature distortions (DICFD) are brilliantly handled with more complicated neural networks — of hierarchical and convolutional type (cognitrons and neocognitrons). However, these complicated

neural networks consume much of memory and processor resources. This undesirably delays the classification process, and in rapid flow tracking systems the tracker will only contour the objects, not keeping pace with classifying them and queuing up.

### Lightening and acceleration in classifying objects with DICFD

Problem of classifying objects with DICFD that lies in consuming resources hugely and functioning lingeringly, would be solved if perceptrons as the swiftest neural networks could be effectively trained on objects with DICFD. Particularly, 2-layer perceptron (2LP) is nearly the best for classifying objects with DCFD, especially when the distortion intensity has the normal statistical distribution (all the more if there is zero expectation). Objects with DICFD, for instance, turned-scaled objects (TSO), constitute training sets, which cannot train 2LP satisfactorily [6, 7]. Weak convergence and lingering training process are symptoms of 2LP being trained on TSO [8].

Nonetheless 2LP theoretically approximates almost anything with unbounded accuracy [2, 5], if the training set is composed correctly. Being trained on TSO, 2LP clashes against multicollinearity in this distortion type. Multicollinearity generates also statistical distribution-inconsistency. And if multicollinearity in training is removed then 2LP becomes a fine classifier again. Removing the spoken multicollinearity (in general, quasi-multicollinearity or pseudo-multicollinearity) is possible through intercalating objects with DCFD into TSO. Generally speaking, intercalating objects with DCFD into objects with DICFD gives possibility to train multilayer perceptrons for classification of objects with DICFD, what must lighten and accelerate the classification process. Will investigate it on a model of TSO.

### Purpose of the article and tasks for achieving it

The general 2LP performance indicator is its classification error percentage (CEP), calculated in particular as

$$p(A) = \frac{q(A)}{b \cdot N_{\text{class}}} \cdot 100 \quad (1)$$

by the number  $q(A)$  of classification errors, scored at a collection of parameters-attributes  $A$  after  $b$  batches of  $N_{\text{class}}$  objects (by one representative of every class) have fed the input of 2LP. Whatever the object type is, the purpose of the classification process investigator to minimize CEP (1), solving the problem

$$A^* \in \underset{A \in \mathbf{A}}{\text{arg min}} p(A) \quad (2)$$

by the set  $\mathbf{A}$  of all tolerable collections of the parameters-attributes within  $A$ . In the case of TSO any collection  $A$  defines rules and relationships with which DCFD are intercalated into DICFD. According to articles [6, 7, 8], which proposed a method of 2LP performance improvement in classifying TSO via training through TSO with DCFD, a collection  $A$  includes standard deviations (SD), defining the turning distortion intensity (TDI), defining the scaling distortion intensity (SDI), and defining a type of DCFD intensity eventually. There is a relationship among these SD, being an element in the collection  $A$ . With the optimized relationship by (2), 2LP performance might be improved further. In [6, 7, 8] the model of TSO was monochrome  $60 \times 80$  image (M-60-80-I), noted as  $60 \times 80$  matrix of zeros and ones (ZO). There were 26 M-60-80-I, corresponded to 26 enlarged English alphabet capital letters (EEACL). The background is white, and letter casts are black with white crosshatching. EEACL have a lot of generalized attributes of the real world objects (horizontal and vertical lines, squares, circles, crossings, diagonals, curves, serpentine lines, etc.) and their medium format  $60 \times 80$  suits excellently for extrapolating the procedure of solving the problem (2) on other formats and object types.

So, to solve the problem (2) for turned-scaled M-60-80-I (TSM-60-80-I) with the purpose of minimizing CEP over TSM-60-80-I, there are the tasks for achieving this purpose:

1. Make a definition of general totality (GT), containing 26 PO and TSM-60-80-I, where the  $c$ -th PO is supposed to be the  $c$ -th EEACL in the list of alphabetically ordered M-60-80-I of those 26 EEACL,  $c = \overline{1, 26}$ .
2. Make a definition of another GT for training, including the previous one and containing TSM-60-80-I with DCFD.
3. State the configuration description of 2LP.
4. Select a method of 2LP training.
5. State the model of TSM-60-80-I with DCFD.
6. Train 2LP on TSM-60-80-I with DCFD.
7. Test the trained 2LP for evaluating the function  $p(A)$  by  $A \in \mathbf{A}$ .
8. Solve the problem (2) and verify whether CEP  $p(A^*)$  is minimal through re-testing the trained 2LP severer.

Certainly, during development of the article statements these generalized eight items are to be specified more exactly. The parameters-attributes collection  $A$  and the set  $\mathbf{A}$  of such collections will be discussed circumstantially.

### Definition of GT, containing 26 PO and TSM-60-80-I

An M-60-80-I has total number of features

$$\prod_{d=1}^N L_d = \prod_{d=1}^2 L_d = 60 \cdot 80 = 4800 .$$

Then GT

$$G_{2^{4800}} = \left\{ \left\{ \mathbf{B}_c \right\}_{c=1}^{26}, \left\{ \tilde{\mathbf{B}}_m \right\}_{m=1}^{2^{4800}-26} \right\} \tag{3}$$

contains 26 PO  $\left\{ \mathbf{B}_c = \left[ b_{uv}^{(c)} \right]_{60 \times 80} \right\}_{c=1}^{26}$  and  $2^{4800} - 26$  M-60-80-I  $\left\{ \tilde{\mathbf{B}}_m \right\}_{m=1}^{2^{4800}-26}$  as  $60 \times 80$  matrices of ZO. There are TSM-60-80-I among those  $2^{4800} - 26$  M-60-80-I  $\left\{ \tilde{\mathbf{B}}_m \right\}_{m=1}^{2^{4800}-26}$  within GT (3). But whether an element of the subset  $\left\{ \tilde{\mathbf{B}}_m \right\}_{m=1}^{2^{4800}-26} \subset G_{2^{4800}}$  is TSM-60-80-I or not is predefined with that way, starting from the corresponding PO and continuing with its distortion event or process. Therefore, in some cases the fully black M-60-80-I may occur the super-over-enlarged (because if just over-enlarged then white crosshatching would be seen) EEACL “A” (“B”, “E”, “F”, and others with the centered black parts), and in other cases the black M-60-80-I isn’t related to EEACL. In some cases the fully white M-60-80-I may occur just the enlarged EEACL “O” (“C”, “D”, “L”, and others having white spaces in the center of the letter M-60-80-I), and in other cases the white M-60-80-I may just be the tracked background. As soon as a PO has been turned and scaled, it changes into a TSM-60-80-I, whose matrix of ZO belongs to the subset  $\left\{ \tilde{\mathbf{B}}_m \right\}_{m=1}^{2^{4800}-26} \subset G_{2^{4800}}$ .

**Definition of GT, including GT (3) and containing TSM-60-80-I with DCFD**

While being trained, the input of 2LP is fed with samples from GT, constituted on both TSM-60-80-I and TSM-60-80-I with DCFD. The best DCFD is normal with zero expectation, whose intensity is defined with SD  $\lambda$ . Then another GT for training is

$$E = G_{2^{4800}} \cup \tilde{G} \tag{4}$$

by the set  $\tilde{G}$  of  $60 \times 80$  matrices

$$\tilde{G} = \mathbf{G} + \lambda \cdot \mathbf{N} \tag{5}$$

with  $\mathbf{G} \in G_{2^{4800}}$  and  $60 \times 80$  matrix  $\mathbf{N}$  of values of normal variate with zero expectation and unit variance (NVZEUV). GT (4) contains TSM-60-80-I with normally distributed pixel distortion (TSM-60-80-INDPD), which will be used in training.

**2LP configuration description**

Generally speaking, 2LP is a mapping, defined on some GT, and transferring each element of this GT into the set of  $N_{\text{class}}$  classes. This mapping has configuration

$$\mathcal{P}_0 \left( \prod_{d=1}^N L_d, N_{\text{HLN}}, N_{\text{class}}; f_{\text{HLTF}}, f_{\text{OLTF}} \right) \tag{6}$$

by number of hidden layer neurons  $N_{\text{HLN}}$  with hidden layer transfer function  $f_{\text{HLTF}}$  and output layer transfer function  $f_{\text{OLTF}}$ . 2LP (6) for classifying M-60-80-I of  $N_{\text{class}} = 26$  classes is

$$\mathcal{P}_0(4800, N_{\text{HLN}}, 26; f_{\text{HLTF}}, f_{\text{OLTF}}) \tag{7}$$

by integer  $N_{\text{HLN}}$  of order of hundreds or higher, depending on the object model and its distortion type. In training 2LP (6) on elements TSM-60-80-INDPD of GT (4) for classifying elements TSM-60-80-I of GT (3) there is acceptable  $N_{\text{HLN}} = 300$ .

2LP (7) can be configured within MATLAB environment, using accustomed MATLAB function “feedforwardnet” from Neural Network Toolbox. 2LP (7)

$$\mathcal{P}_0(4800, 300, 26; \mathcal{S}, \mathcal{S}) \tag{8}$$

is initialized with the function “feedforwardnet” [8] by “logsig” transfer function (log-sigmoid transfer function or so-called “S-shaped” function)  $\mathcal{S}$ , having totally  $4800 \cdot 300 + 300 + 26 \cdot 300 + 26 = 1448126$  weight and bias values (Figure 1).

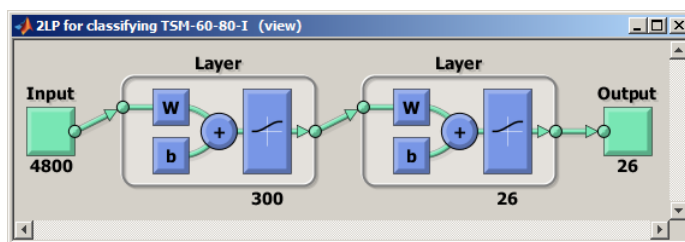


Figure 1. 2LP (8) configuration view

2LP (8) is adapted with weight and bias learning rules by Neural Network Toolbox adapt function “adaptwb”. Usefulness of 2LP (8) during training is measured with its performance function “mse” according to the sum of squared errors. Number of epochs is 15000, and let the minimum performance gradient before training is stopped be  $10^{-6}$  as when the performance gradient becomes less than  $10^{-6}$ , continued training is unlikely to produce significant improvements.

**Selection of a MATLAB function for training of 2LP (8) on TSM-60-80-INDPD**

As the transfer function  $\mathcal{S}$  has derivative, then 2LP (8) can be effectively trained with backpropagation. Backpropagation training with an adaptive learning rate is implemented with MATLAB function “traingda” [8]. The function “traingda” will update 1448126 weight and bias values of 2LP (8) according to gradient descent with the adaptive learning rate [1]. Statistically, “traingda” ensures valid and effective convergence. So, this function selection is grounded on that.

**Models of TSM-60-80-I and TSM-60-80-INDPD**

A one TSM-60-80-INDPD is formed by (5). Mathematically a one TSM-60-80-I is formed before in two stages, although real-time transformation comes with simultaneous turning and scaling. The  $c$ -th class PO  $\mathbf{B}_c$  is scaled into the  $c$ -th class EEACL  $\mathbf{S}_c(z)$  of an intermediary format  $V \times H$ , where  $z = \overline{1, Z}$  and  $Z \in \mathbb{N}$  is number of portions in forming TSM-60-80-I batch. Then  $\mathbf{S}_c(z)$  is turned at an angle, and the turned-scaled  $V \times H$  image  $\mathbf{T}_c(z)$  is re-formatted into TSM-60-80-I  $\mathbf{G}_c(z)$  of the  $c$ -th class EEACL.

For  $z$ -th portion of TSM-60-80-I batch, SD

$$\eta(z) = \frac{\eta_{\max}}{Z} \cdot z \text{ by } z = \overline{1, Z} \tag{9}$$

of SDI at  $\eta_{\max} > 0$  with the value  $\xi(z)$  of NVZEUV  $\Xi(z)$  determines the scale coefficient

$$\varsigma(\eta(z)) = \eta(z)\xi(z) + 1 \tag{10}$$

to the scaling map

$$\sigma[\mathbf{B}_c, \varsigma(\eta(z))] = \mathbf{S}_c(z) \tag{11}$$

with the input PO  $\mathbf{B}_c$ . If occurs  $\varsigma(\eta(z)) \leq 0$  then NVZEUV  $\Xi(z)$  is re-raffled until  $\varsigma(\eta(z)) > 0$ . PO  $\mathbf{B}_c$  is enlarged by  $\varsigma(\eta(z))$  times via (11) if  $\varsigma(\eta(z)) > 1$ , and  $\mathbf{B}_c$  is reduced by  $\frac{1}{\varsigma(\eta(z))}$  times via (11) if  $\varsigma(\eta(z)) < 1$ .

Clearly the input image  $\mathbf{B}_c$  remains PO if  $\varsigma(\eta(z)) = 1$ . In MATLAB the map (11) is supported with MATLAB function “imresize”.

For  $z$ -th portion of TSM-60-80-I batch, SD

$$\mu(z) = \frac{\mu_{\max}}{Z} \cdot z \text{ by } z = \overline{1, Z} \tag{12}$$

of TDI at  $\mu_{\max} > 0$  with the value  $\theta(z)$  of NVZEUV  $\Theta(z)$  determines the angle

$$\rho(z) = \frac{180}{\pi} \cdot \mu(z)\theta(z) \tag{13}$$

in degrees, at which the scaled M-60-80-I as  $\mathbf{S}_c(z)$  is turned around its center point. Matrix of ZO  $\mathbf{S}_c(z)$  is processed into the turned-scaled  $V \times H$  image

$$\mathbf{T}_c(z) = 1 - \tau[1 - \mathbf{S}_c(z), \rho(z)] \tag{14}$$

by the map  $\tau$ , turning the input negative  $1 - \mathbf{S}_c(z)$  at angle (13).  $\mathbf{S}_c(z)$  through (14) is turned in counterclockwise direction if  $\rho(z) > 0$ , and for  $\rho(z) < 0$  it is turned clockwise. Clearly for  $\rho(z) = 0$  the scaled M-60-80-I as  $V \times H$  matrix  $\mathbf{S}_c(z)$  of ZO remains itself.

$\mathbf{T}_c(z)$  is re-formatted into TSM-60-80-I  $\mathbf{G}_c(z)$  via padding or cropping the matrix. If  $\varsigma(\eta(z)) > 1$  then the turned-scaled  $V \times H$  image is cropped by discarding  $I$  lines and  $J$  columns in the matrix  $\mathbf{T}_c(z)$ , where

$$I = \{\overline{1, N_V}, \overline{61 + N_V, V}\}, \quad J = \{\overline{1, N_H}, \overline{81 + N_H, H}\}, \tag{15}$$

$$N_V = \Omega\left(\frac{V}{2}\right) - 30 + \left(\frac{1 + \text{sign} \psi_V \cdot \text{sign} |\psi_V|}{2}\right) \cdot \text{sign} \left[\frac{V}{2} - \Omega\left(\frac{V}{2}\right)\right], \tag{16}$$

$$N_H = \Omega\left(\frac{H}{2}\right) - 40 + \left(\frac{1 + \text{sign} \psi_H \cdot \text{sign} |\psi_H|}{2}\right) \cdot \text{sign} \left[\frac{H}{2} - \Omega\left(\frac{H}{2}\right)\right], \tag{17}$$

and  $\Omega(x)$  is a function, returning the integer part of the number  $x$ , calculated by the values  $\{\psi_V, \psi_H\}$  of two

independent NVZEUV. These NVZEUV are raffled every time, when the function  $\Omega(x)$  is applied. If  $\zeta(\eta(z)) < 1$  the turned-scaled  $V \times H$  image  $\mathbf{T}_c(z)$  is contoured rectangularly with the background white color: the matrix  $\mathbf{T}_c(z)$  is padded from left and from right for

$$N_{\text{left}} = \Omega\left(\frac{80-H}{2}\right) + \left(\frac{1 + \text{sign} \psi_H}{2} \cdot \text{sign} |\psi_H|\right) \cdot \text{sign} \left[\frac{H}{2} - \Omega\left(\frac{H}{2}\right)\right] \quad (18)$$

and

$$N_{\text{right}} = 80 - H - N_{\text{left}} \quad (19)$$

columns of ones (in MATLAB the white color is coded with ones) correspondingly, and it is padded from top and from bottom for

$$N_{\text{top}} = \Omega\left(\frac{60-V}{2}\right) + \left(\frac{1 + \text{sign} \psi_V}{2} \cdot \text{sign} |\psi_V|\right) \cdot \text{sign} \left[\frac{V}{2} - \Omega\left(\frac{V}{2}\right)\right] \quad (20)$$

and

$$N_{\text{bottom}} = 60 - V - N_{\text{top}} \quad (21)$$

lines of ones correspondingly. In MATLAB the map  $\tau$  in (14) is supported with MATLAB function “imrotate”.

Before forming TSM-60-80-INDPD batch, matrices  $\{\mathbf{G}_c(z)\}_{c=1}^{26}$  of ZO for all 26 classes TSM-60-80-I are reshaped into  $4800 \times 26$  matrix  $\bar{\mathbf{G}}(z)$ , whose  $c$ -th column is matrix  $\mathbf{G}_c(z)$ , reshaped into  $4800 \times 1$  matrix. And then  $z$ -th portion of TSM-60-80-INDPD batch is  $4800 \times 26$  matrix

$$\tilde{\mathbf{G}}(z) = \bar{\mathbf{G}}(z) + \lambda(z) \cdot \mathbf{N}_{26} \quad (22)$$

by SD

$$\lambda(z) = \frac{\lambda_{\text{max}}}{Z} \cdot z \quad \text{by } z = \overline{1, Z} \quad (23)$$

of pixel distortion intensity (PDI) at  $\lambda_{\text{max}} > 0$  and  $4800 \times 26$  matrix  $\mathbf{N}_{26}$  of values of NVZEUV. Matrix  $\tilde{\mathbf{G}}(z)$  by (22) and SD of PDI (23) includes all 26 classes TSM-60-80-INDPD, where  $c$ -th column of  $\tilde{\mathbf{G}}(z)$  corresponds to the  $c$ -th class.

### Training on TSM-60-80-INDPD

For training on TSM-60-80-INDPD the training set

$$\left\{ \{\bar{\mathbf{B}}\}_{d=1}^R, \{\tilde{\mathbf{G}}(z)\}_{z=1}^Z \right\} \quad (24)$$

feeds the input of 2LP (8) by  $R + Z$  targets as  $R + Z$  identity  $26 \times 26$  matrices, where 26 PO  $\{\mathbf{B}_c\}_{c=1}^{26}$  are reshaped into  $4800 \times 26$  matrix  $\bar{\mathbf{B}}$ , whose  $c$ -th column is  $4800 \times 1$ -reshaped matrix  $\mathbf{B}_c$ , and  $R \in \square$ . The training set (24) is passed through 2LP (8) for  $Q \in \square$  cycles. Thus 2LP (8) is trained on TSM-60-80-INDPD under parameters

$$\{\eta_{\text{max}}, \mu_{\text{max}}, \lambda_{\text{max}}, R, Z, Q\}. \quad (25)$$

Now SD of maximal SDI and TDI can be preset:

$$\eta_{\text{max}} = 0.2, \quad \mu_{\text{max}} = 0.2. \quad (26)$$

The relationship among these SD can be regulated with SD of maximal PDI:

$$r_{\text{PTSSD}} = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\mu_{\text{max}}} = 5\lambda_{\text{max}}. \quad (27)$$

Instead of the ratio (27) there could have been taken another denominator to have  $\lambda_{\text{max}}/\eta_{\text{max}}$ , but not minding equality between  $\eta_{\text{max}}$  and  $\lambda_{\text{max}}$ , and so (27) is an optional parameter, involving both TDI and SDI, where relationship between them  $\mu_{\text{max}}/\eta_{\text{max}}$  is known. Thus let (27) be called pixel-to-turn-scale standard deviations ratio (PTSSDR).

After having been trained under parameters (25), 2LP (8) transforms into 2LP

$$\mathcal{P}(4800, 300, 26; \mathcal{S}, \mathcal{S}; \eta_{\text{max}}, \mu_{\text{max}}, r_{\text{PTSSD}}, R, Z, Q). \quad (28)$$

May the rest of parameters  $\{R, Z, Q\}$  in (25) be preset to  $R = 2$  and  $Z = 8$  by sufficiently great pass integer, say,  $Q = 100$  to obtain fine classification capabilities of 2LP (8). Consequently, after having been trained, 2LP (28) is

$$\mathcal{P}(4800, 300, 26; \mathcal{S}, \mathcal{S}; 0.2, 0.2, r_{\text{PTSSD}}, 2, 8, 100). \quad (29)$$

And this means that here the collection  $A = \{r_{\text{PTSSD}}\}$  for CEP (1) and the problem (2).

### Testing the trained 2LP (29) for evaluating the function $p(r_{\text{PTSSD}})$

While 2LP (29) is tested, its input is fed with TSM-60-80-I, formed by some SD of SDI



$\eta \in [0; \eta_{\max}] = [0; 0.2]$  and some SD of TDI  $\mu \in [0; \mu_{\max}] = [0; 0.2]$ . As those three SD in (9), (12), (23), these SD increase simultaneously also.

Let the input of 2LP (29) be fed with  $b = 200$  batches from GT (3). Let by  $\eta \in [0; 0.2]$  and  $\mu \in [0; 0.2]$  the number of classification errors be  $q(r_{\text{PTSSD}}, \eta, \mu)$ . Then

$$q(r_{\text{PTSSD}}) = \frac{1}{0.2} \int_0^{0.2} q(r_{\text{PTSSD}}, \eta, \mu) d\mu \approx \frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M q\left(r_{\text{PTSSD}}, \frac{j}{5M}, \frac{j}{5M}\right) \quad (30)$$

for  $(M+1)$ -pointed subset  $\left\{\frac{j}{5M}\right\}_{j=0}^M \subset [0; 0.2]$  of segment  $[0; \eta_{\max}]$  and of segment  $[0; \mu_{\max}]$ . It is sufficient to preset  $M = 10$ . Consequently, with (30) CEP (1) is

$$p(r_{\text{PTSSD}}) = \frac{1}{572} \cdot \sum_{j=0}^{10} q\left(r_{\text{PTSSD}}, \frac{j}{50}, \frac{j}{50}\right). \quad (31)$$

Let the segment of values of PTSSDR (27) be denoted as  $\mathbf{A} = [r_{\text{PTSSD}}^{(\min)}; r_{\text{PTSSD}}^{(\max)}]$ . Empirically for  $\lambda_{\max} > 1$  batches of TSM-60-80-INDPD are overloaded with DCFD, and for  $\lambda_{\max} < 0.001$  they are felt to be underloaded. Therefore 2LP (29) is going to be trained by  $r_{\text{PTSSD}} \in [r_{\text{PTSSD}}^{(\min)}; r_{\text{PTSSD}}^{(\max)}] = [0.005; 5]$  for evaluating the function  $p(r_{\text{PTSSD}})$  and solving the problem (2)

$$r_{\text{PTSSD}}^* \in \arg \min_{r_{\text{PTSSD}} \in [0.005; 5]} p(r_{\text{PTSSD}}). \quad (32)$$

Firstly let the segment of PTSSDR (27) be sampled rough, from the right side. For obtaining preliminary results faster, let take 2LP

$$\mathcal{P}(4800, 300, 26; \mathcal{E}, \mathcal{E}; 0.2, 0.2, r_{\text{PTSSD}}, 2, 8, 25). \quad (33)$$

instead of 2LP (29). Thus there is PTSSDR segment subset

$$\{0.5 + 0.25i\}_{i=0}^{18} \subset [r_{\text{PTSSD}}^{(\min)}; r_{\text{PTSSD}}^{(\max)}] = [0.005; 5] \quad (34)$$

and for each of 19 points in (34) the value (31) for 2LP (33) is calculated (Figure 2).

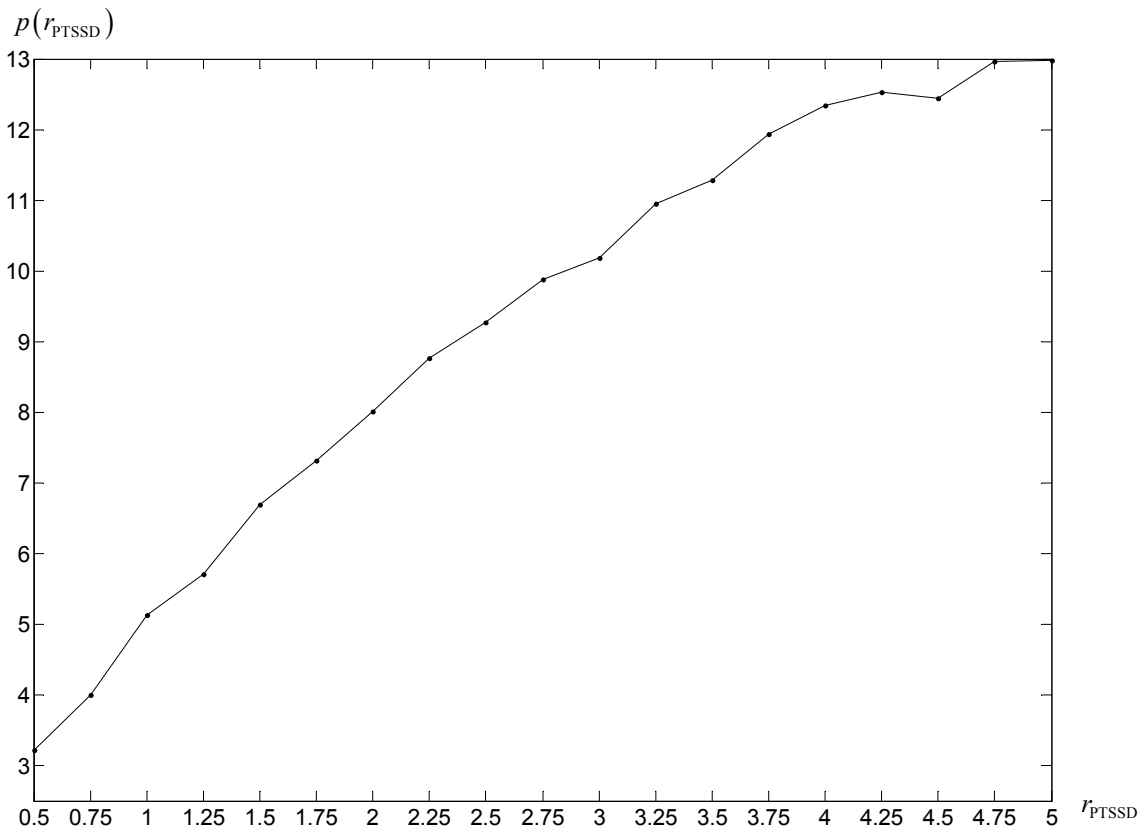


Figure 2. An evaluation of the function  $p(r_{\text{PTSSD}})$  over 50 trained 2LP (33) by every  $r_{\text{PTSSD}} \in \{0.5 + 0.25i\}_{i=0}^{18}$

Obviously, Figure 2 leaves vague notion about the minimum of the function  $p(r_{\text{PTSSD}})$  on the segment

$[0.5; 5]$ . Nevertheless it's clear that the problem (32) is equivalent to the problem

$$r_{PTSSD}^* \in \arg \min_{r_{PTSSD} \in [0.005; 0.75]} p(r_{PTSSD}), \tag{35}$$

whatever  $Q$  is. Then the function  $p(r_{PTSSD})$  for 2LP (33) is re-evaluated finer on PTSSDR subsegment  $[0.005; 0.75]$  subsets (Figure 3)

$$\begin{aligned} \{0.005 + 0.005i\}_{i=0}^9, \{0.1 + 0.05i\}_{i=0}^8, 0.75\} &\subset [0.005; 0.75] \subset [0.005; 5], \\ \{0.005 + 0.005i\}_{i=0}^{19}, \{0.1 + 0.05i\}_{i=1}^{13}\} &\subset [0.005; 0.75] \subset [0.005; 5]. \end{aligned} \tag{36}$$

Those re-evaluations may be considered as zooms in the function  $p(r_{PTSSD})$  on PTSSDR subsegment  $[0.005; 0.75] \subset [0.005; 5]$ .

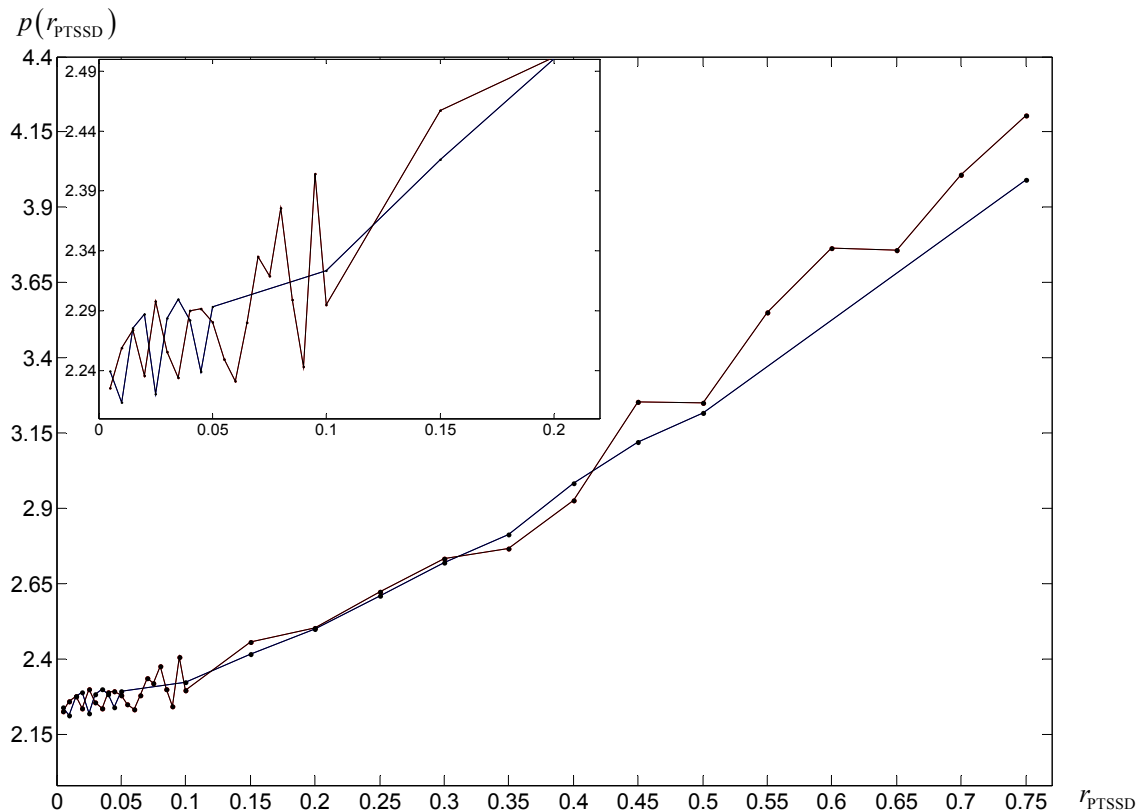


Figure 3. Re-evaluations of the function  $p(r_{PTSSD})$  for trained 2LP (33)

Unexpectedly, Figure 3 has shown that  $r_{PTSSD}^* < 0.2$ , although this is just for  $Q = 25$ . And 0.005-sampling is redundant. Nonetheless, re-evaluations of  $p(r_{PTSSD})$  for 2LP (33) narrow the problem (35) to the problem

$$r_{PTSSD}^* \in \arg \min_{r_{PTSSD} \in [0.005; 0.4]} p(r_{PTSSD}). \tag{37}$$

For trained 2LP (29) subsequently, Figure 4 contains evaluation of the function  $p(r_{PTSSD})$  on PTSSDR subsegment  $[0.005; 0.4]$  subset

$$\{0.01 + 0.01i\}_{i=0}^9, \{0.1 + 0.1i\}_{i=1}^3\} \subset [0.005; 0.4] \subset [0.005; 0.75] \subset [0.005; 5] \tag{38}$$

along with the point  $r_{PTSSD} = 0$ . Also the upper  $\hat{p}(r_{PTSSD})$  and lower  $\check{p}(r_{PTSSD})$  envelopes of the function  $p(r_{PTSSD})$  realizations are shown. For averaging, here 20 realizations of the function  $p(r_{PTSSD})$  on subset (38) are used. All they are shown in Figure 5.

The evaluation of the function  $p(r_{PTSSD})$  in Figure 4 shows that  $r_{PTSSD}^* = 0.01$ . The lower envelope of 20 single realizations of the function  $p(r_{PTSSD})$  in Figure 5 prompts the same. Contrariwise,  $r_{PTSSD}^* = 0.1$  by the upper envelope. Hence, due to unstable evaluations, the problem (37) solution is  $r_{PTSSD}^* \in [0.01; 0.1]$ .

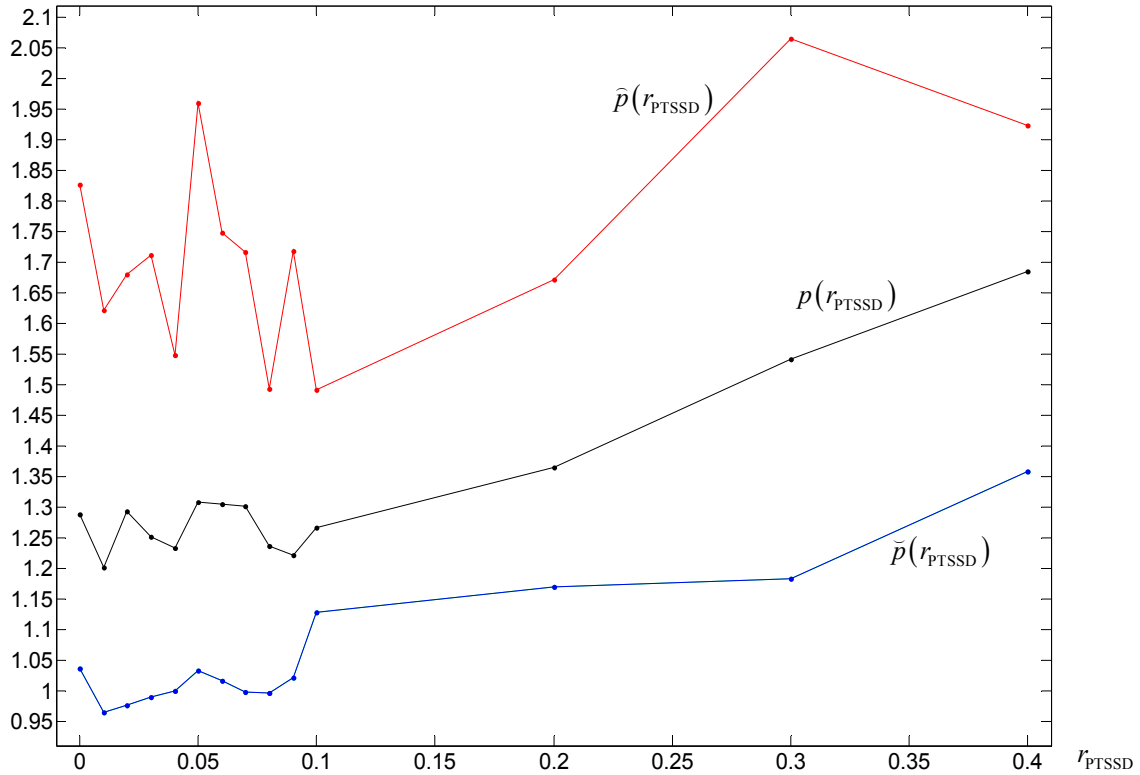


Figure 4. Evaluations of the function  $p(r_{PTSSD})$  for trained 2LP (29) with the upper and lower envelopes on finite subset (38) along with the point  $r_{PTSSD} = 0$

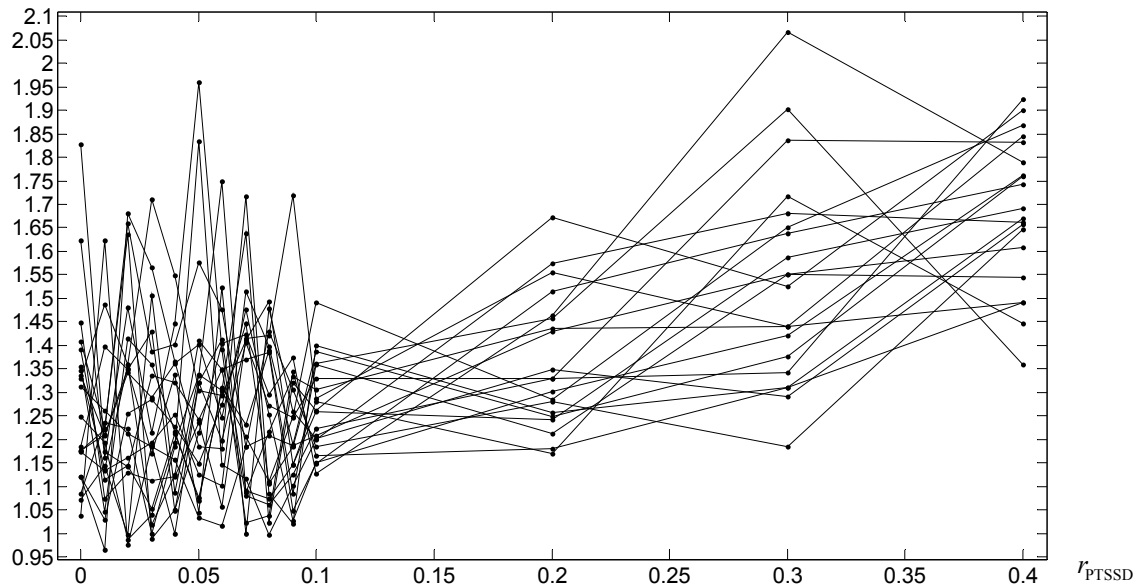


Figure 5. 20 single realizations of the function  $p(r_{PTSSD})$  for trained 2LP (29) on subset (38) along with the point  $r_{PTSSD} = 0$

**Problem (32) solution and its verification**

Figure 4 and Figure 5 both reveal a cavity within PTSSDR subsegment  $[0.005; 0.4] \subset [0.005; 5]$  where  $r_{PTSSD}^* \in [0.01; 0.1]$  in accordance with 0.01-sampling in (38). Henceforward, the point  $r_{PTSSD}^* \in [0.01; 0.1]$  may be called 0.01-optimal PTSSDR, providing locally 0.01-minimal CEP

$$p(r_{PTSSD}^*) = p(0.01) < 0.97 \tag{39}$$

for 2LP

$$\mathcal{P}(4800, 300, 26; \mathcal{E}, \mathcal{E}; 0.2, 0.2, 0.01, 2, 8, 100) \tag{40}$$

performance. PTSSDR axis accuracy 0.01 might have been increased more, say, up to 0.005 or 0.0025, but then solving the problem (37) would have taken much more periods (realizations), what wouldn't have been reasonable due to that the difference between (39) and

$$\min_{r_{PTSSD} \in \{[0.01; 0.1]\} \setminus \{0.01\}} p(r_{PTSSD}^*) \tag{41}$$

is too small (Figure 5), and there are no any grounds to think that 0.005-optimal PTSSDR or 0.0025-optimal PTSSDR would have provided decrement of CEP, greater than that difference. However, evaluations in Figure 5 have been obtained, feeding the input of 2LP (29) with  $b = 200$  batches from GT (3). They may probably change, being evaluated more accurate, when  $b$  is preset greater. Let  $b = 2000$  to verify the point  $r_{PTSSD}^* = 0.01$  (the segment  $[0.01; 0.1]$  of PTSSDR) optimality. Figure 6 zooms in PTSSDR subsegment  $[0; 0.2]$ , where the function  $p(r_{PTSSD})$  is refreshed on PTSSDR subsegment  $[0; 0.2]$  subset  $\{0, 0.01, 0.1, 0.2\} \subset [0; 0.2]$ . Indeed, 0.01-optimal PTSSDR remains  $r_{PTSSD}^* \in [0.01; 0.1]$  with CEP

$$p(r_{PTSSD}^*) = p(0.01) < 1.004, \tag{42}$$

what is slightly greater than CEP (39). Figure 7 visualizes SDI and TDI by (26), which form TSM-60-80-I of EEACL, and all these TSM-60-80-I have been successfully classified with 2LP (40).

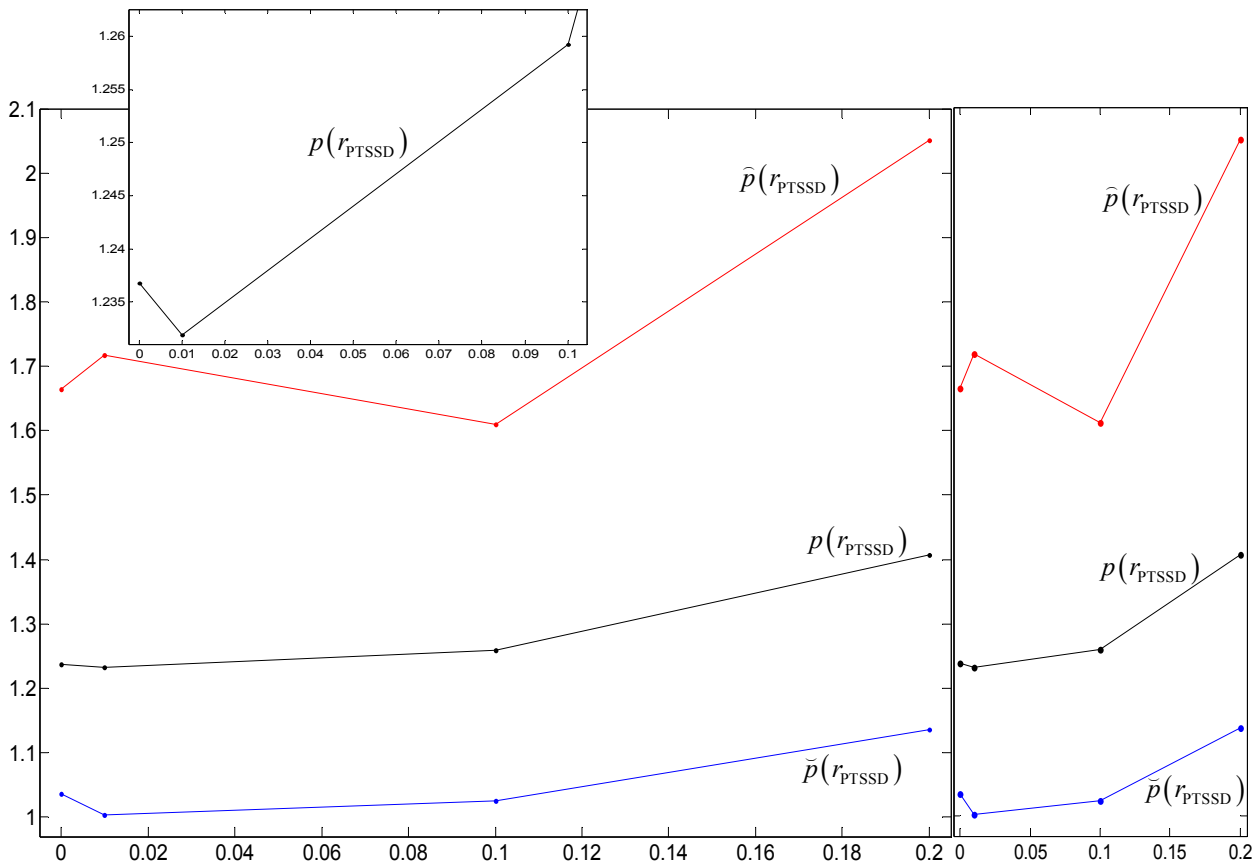


Figure 6. Re-evaluations of the function  $p(r_{PTSSD})$  cavity on 54 trained 2LP (29) by  $r_{PTSSD} \in \{0, 0.01, 0.1, 0.2\}$

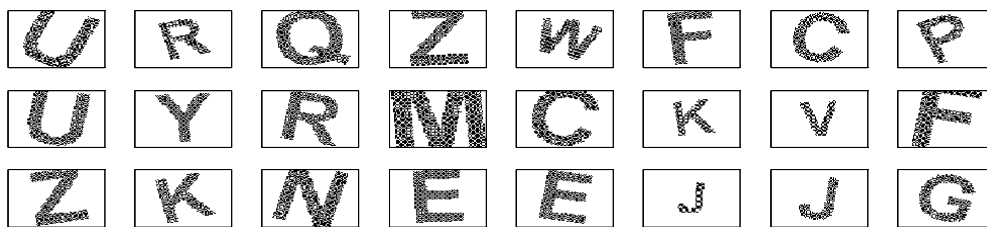


Figure 7. TSM-60-80-I of EEACL by SD of SDI and TDI (26), fed the input of 2LP (40), performing with 0.01-minimal CEP (42)

Eventually, CEP (31) for 2LP (29) has been minimized in accordance with the problem (32). Minimization has been verified with 10 times greater feed at the classifier input than the feed while the function  $p(r_{PTSSD})$  was being evaluated. Locally, PTSSDR  $r_{PTSSD}^* = 0.01$  drives 2LP (29) into 2LP (40), that effectively classifies TSO, modeled as TSM-60-80-I of 26 EEACL.

**Comprehension and possibility of further 2LP performance improvement**

Naturally, if by  $N_{class} = 26$  there were other object type of  $60 \times 80$  binary format (not EEACL), noted with

matrix of ZO, then the result of (32) would be nearly the same, close to  $r_{\text{PTSSD}}^* = 0.01$  or  $r_{\text{PTSSD}}^* \in [0.01; 0.1]$ . Moreover, inasmuch as  $N$ -dimensional objects, feeding the input of 2LP, with its  $N$ -dimensional matrix  $\mathbf{B} = [b_j]_{\mathcal{Z}}$  of ZO is always reshaped into  $\left( \prod_{d=1}^N L_d \right) \times 1$  matrix, then nearly the same minimum point  $r_{\text{PTSSD}}^* = 0.01$  must be for any object, having 4800 binary features. That is there can be TSO of formats  $80 \times 60$ ,  $6 \times 8 \times 100$ ,  $12 \times 4 \times 10 \times 10$ ,  $2 \times 2 \times 4 \times 3 \times 5 \times 10 \times 2$ , etc. 2LP  $\mathcal{P} \left( \prod_{d=1}^N L_d, 300, N_{\text{class}}; \mathcal{E}, \mathcal{E}; 0.2, 0.2, 0.01, 2, 8, 100 \right)$  for other medium formats, where objects have a few thousands of features  $\prod_{d=1}^N L_d$  and number  $N_{\text{class}}$  is about 20 — 35, must perform near-optimally as well.

Further improvement of 2LP performance over TSO is perceived in optimizing the integer  $N_{\text{HLN}}$ . The optimally adjusted  $N_{\text{HLN}}$  will allow to accelerate the training process, making the configuration of 2LP lighter. Of course, that noticeable minimization of CEP over TSO should be done for  $N_{\text{HLN}}$  and  $r_{\text{PTSSD}}$  simultaneously — power-computational evaluations of CEP surface  $p(N_{\text{HLN}}, r_{\text{PTSSD}})$  are inescapable.

## References

1. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd ed., Moscow, Publishing house “Williams”, 2006, 1104 p.
2. Gorban A. N. Generalized approximation theorem and computational capabilities of neural networks, Siberian journal of computational mathematics, 1998, Vol. 1, N. 1, pp. 11 – 24.
3. Ghimire S., Wang H. Classification of image pixels based on minimum distance and hypothesis testing, Computational Statistics & Data Analysis, 2012, Vol. 56, Iss. 7, pp. 2273 – 2287.
4. Farid D. M., Zhang L., Rahman C. M., Hossain M. A., Strachan R. Hybrid decision tree and naïve Bayes classifiers for multi-class classification tasks, Expert Systems with Applications, 2014, Vol. 41, Iss. 4, Part 2, pp. 1937 – 1946.
5. Arulampalam G., Bouzerdoum A. A generalized feedforward neural network architecture for classification and regression, Neural Networks, 2003, Vol. 16, Iss. 5–6, pp. 561 – 568.
6. Romanuke V. V. A 2-layer perceptron performance improvement in classifying 26 turned monochrome 60-by-80-images via training with pixel-distorted turned images, Research bulletin of the National Technical University of Ukraine “KPI”, 2014, N. 5, pp. 55 – 62.
7. Romanuke V. V. Classification error percentage decrement of two-layer perceptron for classifying scaled objects on the pattern of monochrome 60-by-80-images of 26 alphabet letters by training with pixel-distorted scaled images, Scientific bulletin of Chernivtsi National University of Yuriy Fedkovych. Series: Computer systems and components, 2013, Vol. 4, Iss. 3, pp. 53 – 64.
8. Romanuke V. V. A 2-layer perceptron performance improvement in classifying turned-scaled monochrome 60×80 images via training through turned-scaled images with pixel distortion, Scientific bulletin of Chernivtsi National University of Yuriy Fedkovych. Series: Computer systems and components, 2013, Vol. 4, Iss. 4, pp. 56 – 65.

## Література

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Хайкин С. – [2-е изд.] – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
2. Горбань А. Н. Обобщённая аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А. Н. Горбань // Сибирский журнал вычислительной математики, 1998. – Т. 1, № 1. – С. 11 – 24.
3. Ghimire S. Classification of image pixels based on minimum distance and hypothesis testing / S. Ghimire, H. Wang // Computational Statistics & Data Analysis. – 2012. – Volume 56, Issue 7. – P. 2273 – 2287.
4. Farid D. M. Hybrid decision tree and naïve Bayes classifiers for multi-class classification tasks / D. M. Farid, L. Zhang, C. M. Rahman, M. A. Hossain, R. Strachan // Expert Systems with Applications. – 2014. – Volume 41, Issue 4, Part 2. – P. 1937 – 1946.
5. Arulampalam G. A generalized feedforward neural network architecture for classification and regression / G. Arulampalam, A. Bouzerdoum // Neural Networks. – 2003. – Volume 16, Issue 5 – 6. – P. 561 – 568.
6. Romanuke V. V. A 2-layer perceptron performance improvement in classifying 26 turned monochrome 60-by-80-images via training with pixel-distorted turned images / V. V. Romanuke // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2014. – № 5. – С. 55 – 62.
7. Romanuke V. V. Classification error percentage decrement of two-layer perceptron for classifying scaled objects on the pattern of monochrome 60-by-80-images of 26 alphabet letters by training with pixel-distorted scaled images / V. V. Romanuke // Науковий вісник Чернівецького університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп’ютерні системи та компоненти. – Чернівці : ЧНУ, 2013. – Т. 4, вип. 3. – С. 53 – 64.
8. Romanuke V. V. A 2-layer perceptron performance improvement in classifying turned-scaled monochrome 60×80 images via training through turned-scaled images with pixel distortion / V. V. Romanuke // Науковий вісник Чернівецького університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп’ютерні системи та компоненти. – Чернівці : ЧНУ, 2013. – Т. 4, вип. 4. – С. 56 – 65.

Рецензія/Peer review : 13.1.2015 р.

Надрукована/Printed : 25.1.2015 р.

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

А.А. ЯРОВИЙ, С.Г. КАШУБІН, О.О. КУЛИК, І.М. ЛИПКАНЬ  
Вінницький національний технічний університет

## РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІЧНИХ МІКРОВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ TIME DELAY NEURAL NETWORK

*В роботі досліджуються окремі підходи до нейромережевого розпізнавання мімичних мікровиразів обличчя людини. На основі їх аналізу запропоновано систему розпізнавання динамічних зображень за допомогою Time Delay Neural Network (TDNN) для підвищення точності розпізнавання мімичних мікровиразів обличчя людини. На основі проведених експериментів досліджено вплив неоднорідності кількості зображень класу на точність розпізнавання та запропоновано спосіб його усунення, що призвело до підвищення точності розпізнавання мімичних мікровиразів обличчя людини як на основі динамічних, так і на основі статичних зображень.*

*Ключові слова: нейронні мережі, обробка зображень, розпізнавання образів, мімичні мікровирази обличчя людини, time delay neural network.*

A.A. YAROVYY, S.G. KASHUBIN, O.O. KULYK, I.M. LYPKAN  
Vinnytsia National Technical University

## PARALLEL-HIERARCHICAL TRANSFORMATION OF SPOT IMAGES BASED ON THE GPU-ORIENTED ARCHITECTURE

*The particular approaches to neural network recognition of human facial microexpression are investigated. On basis of its analysis the TDNN-based system of dynamic images recognition is developed for the purpose of accuracy increment of human facial microexpression recognition. On basis of experimental results the influence of no uniformity of images quantity in collection on accuracy of recognition is investigated. The method for eliminating of above-mentioned influence is proposed. Its ensured to accuracy increment of human facial microexpression recognition both dynamic and static images.*

*Keywords: neural networks, image processing; pattern recognition, human facial microexpression, time delay neural network.*

### Вступ

Мімичні мікровирази є короткими мимовільними виразами, що виникають на обличчі людини, яка свідомо чи несвідомо приховує або подавляє емоцію. Мімичні мікровирази не піддаються свідомому контролю, тому відображають справжнє ставлення людини до того, що відбувається і можуть слугувати ознакою обману при невідповідності до слів чи макровиразів або індикаторами майбутньої поведінки людини (наприклад, людина в гніві є більш схильною до насильницьких дій, ніж у стані спокою). В той же час мімичні мікровирази характеризуються малою тривалістю – до п'ятої частини секунди, тому для недосвідченої людини залишаються зазвичай непоміченими [1]. Вказаний фактор є одним із визначальних для доцільності автоматичного розпізнавання мікровиразів, що дозволить ідентифікувати мікровирази навіть при спостереженні за великою кількістю людей одночасно. Такого роду інтелектуальні системи можуть застосовуватися в медицині, психології, слідчій та охоронній справах. Особливу користь розпізнавання мікровиразів надає для виявлення неправдивих свідчень, що також визначає такі області застосування, як політика, торгівля і журналістика [2]. Окрім того, система розпізнавання мімичних виразів та мікровиразів людини є важливим елементом взаємодії людини і комп'ютера. Враховуючи тотальну комп'ютеризацію, розуміння людських емоцій комп'ютером відкриває нові можливості в багатьох галузях, таких як навчальна та ігрова індустрія. У зв'язку з вищевказаним актуалізується необхідність створення інтелектуальної системи, що виконує розпізнавання мімичних мікровиразів обличчя людини.

Посилення інтересу в сучасному науковому суспільстві до використання нейронних та паралельно-ієрархічних мереж та нещодавні досягнення у підвищенні їх ефективності вказують на можливість їх застосування для створення вищевказаної інтелектуальної системи [3–6].

Представлені дослідження присвячено розпізнаванню мімичних мікровиразів обличчя людини з використанням технологій нейронних мереж. Задача розпізнавання зображень мімичних мікровиразів обличчя людини трактується в роботі в контексті задачі класифікації зображень обличчя людини у відповідності до емоції, що відображена мікровиразом. Вхідними даними системи є цифрові зображення обличчя людини в анфас у кольоровій моделі "Grayscale". У табл. 1 наведено окремі результати проведеного аналізу існуючих методів нейромережевого розпізнавання мімичних мікровиразів обличчя людини із зазначенням досягнутої точності розпізнавання на невідомих для нейромережі обличчях (тестова вибірка).

Усі вказані методи були використані авторами для розпізнавання виразів обличчя на основі статичних зображень. У загальному випадку розпізнавання виразів обличчя на основі динамічних зображень (відеорядів) можна звести до розпізнавання на статичних зображеннях кожного кадру. Однак такий спосіб не враховує різницю між окремими кадрами динамічного зображення, тому не використовує частину наявної інформації про вираз обличчя, що підлягає розпізнаванню.

В даній роботі запропоновано розпізнавання динамічних зображень за допомогою Time Delay Neural Network – нейромережі, яка пристосована для роботи з часовими послідовностями вхідних даних і враховує вищевказану інформацію [13]. Це дозволяє підвищити точність розпізнавання порівняно із покадровим розпізнаванням виразів обличчя на статичних зображеннях.

Таблиця 1

**Існуючі методи нейромережевого розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини**

Метод розпізнавання	Автор(и)	Рік	Точність
Нейронні мережі на основі радіально-базисних функцій	M. Rosenblum, L. Davis, Y. Yacoob [7]	1994	73%
Нейромережі Елмана	J.-Y. Chang, J.-L. Chen [8]	2001	84.7%
Квантові нейромережі	P. Li, J. Li [9]	2008	96.5%
Згорточні нейронні мережі	B. Fasel [10]	2009	30%
Глибокі нейромережі з попереднім навчанням без учителя	T. McLaughlin, G. E. Hinton [11, 12]	2010	67%

В якості тренувальних та тестових зображень обрано зображення із міжнародної бази даних Extended Cohn-Kanade Facial Expression Dataset, University of Pittsburgh, USA (327 динамічних зображень) [14], оскільки ця база даних містить набори кадрів для кожного динамічного зображення (відеоряду). Існуючий підхід до нейромережевого розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини на статичних зображеннях, що також використовує цю базу, описаний Т. McLaughlin [11] і полягає у застосуванні глибоких нейронних мереж. Найкраща досягнута точність розпізнавання – 67%. Інші вищезгадані підходи застосовують набори окремих статичних зображень замість кадрів із відеоряду, тому такі набори не можуть бути застосовані для тестування методу розпізнавання динамічних зображень.

Метою дослідження є збільшення точності розпізнавання динамічних зображень шляхом використання нейронних мереж типу Time Delay Neural Network. Для цього було використано середовище програмування MATLAB й експериментальним шляхом визначено найкращі параметри мережі та алгоритм навчання.

Задачами дослідження є: визначення показників точності існуючих підходів до задачі нейромережевого розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини, реалізація системи нейромережевого розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини на основі Time Delay Neural Network, аналіз одержаних в ході експериментальних досліджень показників точності розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини на основі Time Delay Neural Network.

### Розпізнавання динамічних зображень мимічних мікровиразів обличчя людини на основі Time Delay Neural Network

Time Delay Neural Network (TDNN) – тип нейронних мереж, що застосовується до послідовностей вхідних даних, диференційованих у часі [13]. Їх основною особливістю є те, що вхід кожного нейрона прихованого шару має зв'язки не лише із безпосередньо вхідними даними поточного моменту часу, але й з вхідними даними  $K$  попередніх моментів. Зв'язок із  $i$ -м елементом вхідних даних має однакову вагу для кожного з  $K$  моментів часу, що спрощує структуру нейромережі та, водночас, забезпечує можливість відокремлення незалежних та залежних від часу ознак. Параметр  $K$  – затримка прихованого шару TDNN, оскільки мережа починає працювати лише після проходження  $K$  квантів часу від початку надходження вхідних даних. Варто зауважити, що затримка може бути введена й на глибших шарах нейромережі. Структуру Time Delay Neural Network зображено на рис. 1.

Для реалізації системи було обране середовище програмування MATLAB, оскільки воно має вбудовану бібліотеку для роботи з Time Delay Neural Network і дозволяє здійснювати моніторинг процесу їх навчання та тестування.

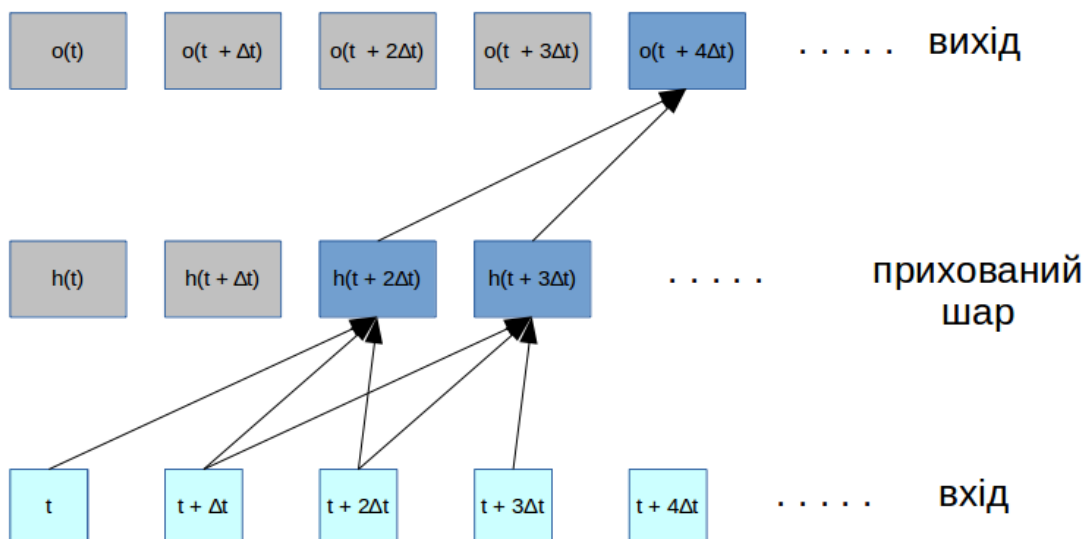


Рис. 1. Структура Time Delay Neural Network із затримкою на вхідному шарі (рівною 2) та затримкою на прихованому шарі (рівною 1)

Кожен відеоряд із бази даних представляє появу на обличчі виразу певної емоції із нейтрального виразу [14]. Оскільки тривалість мимічного мікровиразу складає 0.02 – 0.5 с [1], то відеоряди було штучно пришвидшено, для того щоб імітувати швидку появу емоції. Із кожного відеоряду було обрано 5 зображень – перше, останнє та третє (між ними) на рівній відстані між собою. Окрім адаптації під швидкість появи мікровиразу, це дозволило уникнути необхідності аналізу емоцій на кожному кадрі, а вважати натомість, що на трьох останніх кадрах емоція проявляється, а на двох перших – ні.

В якості тренувального набору було обрано випадковим чином 70% від загальної кількості відеорядів. Відеоряди, що залишилися (30%), було використано в якості тестового набору.

Для передобробки зображення використано: для виділення точок – Active Appearance Model [15], а також нормалізацію значень їх координат до відрізка [-1;1]. Active Appearance Model (AAM) є статистичною моделлю форми досліджуваного об'єкту й розподілу відтінків у моделі "Grayscale" на його зображенні [15]. Під час навчання ААМ виявляє зв'язок між зміщеннями параметрів моделі та різницями між навчальним зображенням і синтезованим за допомогою моделі зображенням. Для узгодження параметрів поточної моделі із зображенням, що обробляється, вимірюються вищевказані різниці й параметри змінюються на значення, отримані за допомогою статистичної моделі, що приводить до більшої відповідності поточної моделі до зображення. Зазвичай прийнятне для подальшого застосування співпадіння досягається вже після кількох таких ітерацій. Для навчання ААМ використовується набір зображень із виділеними точками орієнтуру на кожному зображенні. Точки орієнтуру описують форму досліджуваного об'єкту на зображенні. Приклад такого зображення наведений на рис. 2 [15].



Рис. 2. Зображення із виділеними точками орієнтуру для ААМ [15]

При цьому було використано можливість задавання таких параметрів навчання: об'єм тренувальної й контрольної вибірки, максимальна кількість ітерацій навчання (1000), максимальна кількість ітерацій збільшення похибки розпізнавання контрольної вибірки для передчасної зупинки навчання (75), затримка прихованого шару та кількість нейронів у прихованому шарі. Значення останніх двох параметрів, що дозволили досягти покращення точності, було встановлено експериментальним шляхом для кожного окремого алгоритму навчання.

Для кожного окремого алгоритму навчання із визначеними значеннями всіх параметрів було проведено незалежні експериментальні дослідження, що містили процеси створення та навчання нової мережі. Оскільки початкові ваги зв'язків ініціалізуються випадковими числами, результати навчання двох мереж, створених незалежно, можуть різнитися, незважаючи на однакові архітектури та тренувальні набори зображень.

Середнє значення точності із десяти експериментів розпізнавання динамічних зображень за допомогою Time Delay Neural Network склало 88%, найкраще значення точності – 91%.

Як видно, досягнуто покращення точності на 24% порівняно з існуючим підходом. Це дозволяє зробити висновок, що використання Time Delay Neural Network, а отже – врахування інформації про різницю між сусідніми кадрами – збільшує точність розпізнавання мимічних мікровиразів обличчя людини на динамічних зображеннях.

### Дослідження впливу неоднорідності кількості зображень у різних класах на точність розпізнавання

Використаний набір зображень із міжнародної бази даних Extended Cohn-Kanade Facial Expression Dataset, University of Pittsburgh, USA (327 динамічних зображень) [14] містить зображення мікровиразів, що відображають 7 різних емоцій, однак у різних пропорціях. Так, емоції "відраза" відповідає лише 18 зображень, у той час як емоції "радість" – 86. Для дослідження впливу неоднорідності у кількості прикладів кожного класу в тренувальних даних на точність розпізнавання було проведено навчання 7 різних систем бінарної класифікації, які відрізняли одну емоцію від усіх інших та проведено оцінювання точності розпізнавання за метрикою F1-score [16].

Залежність F1-score від кількості зображень у базі, що відповідають класу певної емоції, зображено на рис. 3. Значення 0 відповідає виродженій системі, що класифікувала всі зображення в один клас.

Як видно, зазначена неоднорідність сильно впливає на точність розпізнавання. На початковому етапі було розроблено систему, яка розрізняє лише 3 види емоцій, що представлені в базі найбільшою кількістю зображень (здивування, радість та відраза). Точність розпізнавання склала 99%. Також, було розроблено систему, яка розпізнає 4 види емоцій, що представлені в базі найбільшою кількістю зображень (здивування, радість, відраза та гнів). Точність такої системи склала 94%.

Для зменшення впливу вищевказаної неоднорідності на точність розпізнавання було використано наступний підхід: зображення із класу, що має невелику порівняно з іншими кількість зображень (в даному випадку – менше 60 зображень) було дубльовано відповідну кількість разів (так, щоб в результаті клас був представлений не менш ніж 60 зображеннями) лише в тренувальному наборі. Тестовий набір зображень



залишилися без змін. При цьому співвідношення кількості тренувальних та тестових зображень змінилося до 80% і 20% відповідно за рахунок збільшення кількості тренувальних зображень.

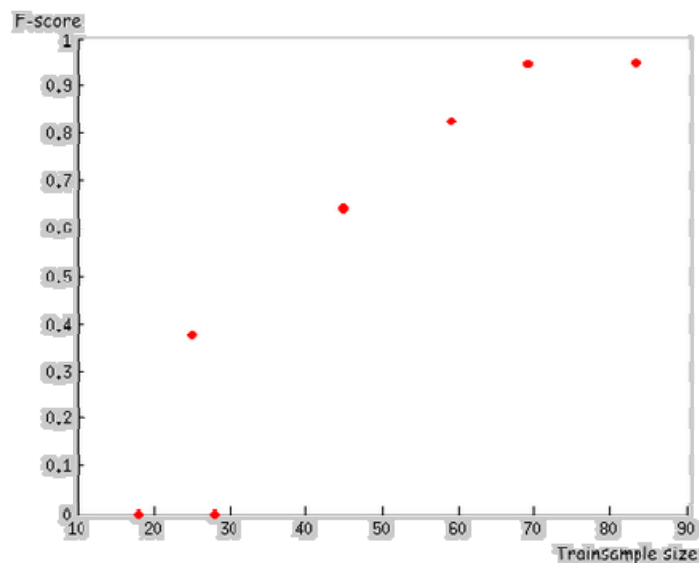


Рис. 3. Залежність метрики F1-score від кількості зображень, що відповідають емоції

Після повторного проведення навчання різних систем бінарної класифікації, які відрізняли одну емоцію від усіх інших, значення F1-score для жодного з класів не було менше за 0.8, що вказує на успішність використаного підходу усунення неоднорідності.

При використанні однієї Time Delay Neural Network для розпізнавання усіх класів при умові дублювання тренувальних зображень класів із малою кількістю представників середнє значення точності з 10 незалежних експериментів – 93%, найкраща досягнута точність – 95%.

### Висновки

Проведені дослідження присвячено вирішенню задачі нейромережевого розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини. На їх основі запропоновано систему розпізнавання динамічних зображень за допомогою Time Delay Neural Network для підвищення точності розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини.

У роботі проаналізовано існуючі підходи до задачі розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини у статичній й вказано на їх недоліки у зв'язку із додатковою інформацією, яку містять динамічні зображення. У зв'язку з цим для розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини на динамічних зображеннях використано Time Delay Neural Network, що пристосована для роботи з часовими послідовностями. В якості тренувальних та тестових зображень для експериментальних досліджень розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини обрано зображення із міжнародної бази даних Extended Cohn-Kanade Facial Expression Dataset, University of Pittsburgh, USA [14], оскільки ця база даних містить набори кадрів для кожного динамічного зображення (відеоряду). Точність розпізнавання за допомогою Time Delay Neural Network складає 95%, що є значним покращенням порівняно із роботою T. McLaughlin (67%) – існуючим методом розпізнавання мімічних мікровиразів на статичних зображеннях із тієї самої бази даних.

У роботі розглянуто вплив неоднорідності кількості зображень класу на точність розпізнавання та запропоновано спосіб його усунення, що у розглянутому випадку призвів до підвищення точності розпізнавання на динамічних зображеннях з 91% до 95% та на статичних зображеннях з 67% до 72%.

З цього можна зробити висновок, що використання Time Delay Neural Network для розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини на динамічних зображеннях дозволяє збільшити точність розпізнавання порівняно із покадровим розпізнаванням виразів на статичних зображеннях.

Основним шляхом подальшого вдосконалення даної системи є її модифікація, яка передбачає комбінування інших методів розпізнавання на динамічних та статичних зображеннях. Зокрема, в подальших дослідженнях планується застосування комбінованого підходу із використанням Time Delay Neural Network та глибокої нейромережі для покадрової обробки з метою збільшення точності розпізнавання.

### Література

1. Экман П. Психология эмоций / Экман П. – СПб : Питер, 2011. – 336 с.
2. P. Ekman, "Telling Lies: Clues to Deceit in the Marketplace, Politics, and Marriage", New York: W. W. Norton & Company, 2009. – 416 p.
3. S. O. Haykin "Neural Networks and Learning Machines", Third Edition, Prentice Hall, 2009. – 936 p.

4. S. Wermter, C. Weber, W. Duch, T. Honkela, and more "Artificial Neural Networks and Machine Learning" – ICANN 2014: 24th International Conference on Artificial Neural Networks, Hamburg, Germany, Springer, 2014, 852 p.
5. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту : [монографія.] / В.П. Кожем'яко, Ю.Ф. Кутаєв, С.В. Свєчніков, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с. – ISBN 966-641-072-9.
6. Образний відео-комп'ютер око-процесорного типу : [Монографія] / Кожем'яко В.П., Лисенко Г.Л., Яровий А.А., Кожем'яко А.В. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2008. – 215 с. – ISBN 978-966-641-261-7.
7. M. Rosenblum, Y. Yacoob, L. Davis, "Human Emotion Recognition from Motion Using a Radial Basis Function Network Architecture", IEEE Workshop on Motion of Non-Rigid and Articulated Objects, 1994, pp. 43–49.
8. J.-Y. Chang, J.-L.Chen, "Automated Facial Expression Recognition System Using Neural Networks". Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2001, vol. 24, No. 3. – pp. 345-356.
9. P. Li, J. Li, "A Facial Expression Recognition Method Based on Quantum Neural Networks", Proceedings of International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, 2007, pp. 74–78.
10. B. Fasel, "Multiscale Facial Expression Recognition using Convolutional Neural Networks" // IDIAP Research Report 02-52. – 2002. – pp. 2–9.
11. T. McLaughlin, M. Le, N. Bayanbat, "Emotion Recognition with Deep-Belief Networks" // Stanford CS 229 Machine Learning Final Projects. – 2010. – pp. 62–66.
12. G. E. Hinton, S. Osindero, and Y.-W. Teh, "A fast learning algorithm for deep belief nets," Neural computation, 2006, vol. 18, no. 7, pp. 1527–1554.
13. A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano, and K. Lang, "Phoneme Recognition Using Time-Delay Neural Networks ", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, vol. 37, no. 3, pp. 328–339.
14. Lucey, P.; Cohn, J.F.; Kanade, T.; Saragih, J.; Ambadar, Z.; Matthews, I., "The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression," Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference, 13-18 June 2010, pp.94-101.
15. T. F. Cootes, G. J. Edwards, C. J. Taylor, "Active Appearance Models", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2001, vol. 23, no. 6, pp. 681-685.
16. D. M. W. Powers, "Evaluation: from Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation, International Journal of Machine Learning Technology, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 37–63.

#### References

1. P. Ekman, "Emotions Revealed: Recognizing Faces and Feelings to Improve Communication and Emotional Life", Publishing House "Piter", 2011. – 336 p.
2. P. Ekman, "Telling Lies: Clues to Deceit in the Marketplace, Politics, and Marriage", New York: W. W. Norton & Company, 2009. – 416 p.
3. S. O. Haykin "Neural Networks and Learning Machines", Third Edition, Prentice Hall, 2009. – 936 p.
4. S. Wermter, C. Weber, W. Duch, T. Honkela, and more "Artificial Neural Networks and Machine Learning" – ICANN 2014: 24th International Conference on Artificial Neural Networks, Hamburg, Germany, Springer, 2014, 852 p.
5. V.P. Kozhemyako, Yu.F. Kutaev, S.V. Svechnikov, L.I. Tymchenko, A.A. Yarovy, "Parallel-Hierarchical Transformation as the System Model of Optoelectronic Artificial Intelligence Tools", Monograph, Universum-Vinnitsia, 2003. – 324 p. – ISBN 966-641-072-9.
6. V.P. Kozhemyako, G.L. Lysenko, A.A. Yarovy, A.V. Kozhemyako, "Pattern video-computer of eye-processor type", Monograph, Universum-Vinnitsia, 2008. – 215 p. – ISBN 978-966-641-261-7.
7. M. Rosenblum, Y. Yacoob, L. Davis, "Human Emotion Recognition from Motion Using a Radial Basis Function Network Architecture", IEEE Workshop on Motion of Non-Rigid and Articulated Objects, 1994, pp. 43–49.
8. J.-Y. Chang, J.-L.Chen, "Automated Facial Expression Recognition System Using Neural Networks". Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2001, vol. 24, No. 3. – pp. 345-356.
9. P. Li, J. Li, "A Facial Expression Recognition Method Based on Quantum Neural Networks", Proceedings of International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, 2007, pp. 74–78.
10. B. Fasel, "Multiscale Facial Expression Recognition using Convolutional Neural Networks" // IDIAP Research Report 02-52. – 2002. – pp. 2–9.
11. T. McLaughlin, M. Le, N. Bayanbat, "Emotion Recognition with Deep-Belief Networks" // Stanford CS 229 Machine Learning Final Projects. – 2010. – pp. 62–66.
12. G. E. Hinton, S. Osindero, and Y.-W. Teh, "A fast learning algorithm for deep belief nets," Neural computation, 2006, vol. 18, no. 7, pp. 1527–1554.
13. A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano, and K. Lang, "Phoneme Recognition Using Time-Delay Neural Networks ", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, vol. 37, no. 3, pp. 328–339.
14. Lucey, P.; Cohn, J.F.; Kanade, T.; Saragih, J.; Ambadar, Z.; Matthews, I., "The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression," Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference, 13-18 June 2010, pp.94-101.
15. T. F. Cootes, G. J. Edwards, C. J. Taylor, "Active Appearance Models", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2001, vol. 23, no. 6, pp. 681-685.
16. D. M. W. Powers, "Evaluation: from Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation, International Journal of Machine Learning Technology, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 37–63.

Рецензія/Peer review : 5.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Кожем'яко В.П.

В.М. ЛИСОГОР  
Вінницький національний аграрний університет  
А.В. СНИГУР, Р.М. ВІКУЛОВ  
Вінницький національний технічний університет

## АДАПТИВНЕ ОПРАЦЮВАННЯ СТРИБКОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ

*У статті на основі побудованих моделей стрибкоподібних сигналів визначено їх інформативні параметри – “піки”, які використовуються для подальшого кодування. Побудовано алгоритм адаптивного опрацювання стрибкоподібних сигналів з урахуванням наявних “піків” у сигналах. Розроблено алгоритм “грубого” швидкісного кодування сигналів.*

*Ключові слова: біологічно активна точка, способи зменшення впливу завад на вимірювальний сигнал, інформаційно-вимірювальна система, сигнали, адаптивний алгоритм.*

V. M. LISOGOR  
Vinnytsia National Agrarian University  
A. V. SNIGUR, R. M. VIKULOV  
Vinnytsia National Technical University

## ADAPTIVE WORKING OF SALTATORY SIGNALS

*Abstract – In the article on the basis of the built models of saltatory signals certainly their informing parameters are “lances” which are used for a subsequent code. The algorithm of the adaptive working of saltatory signals is built taking into account present “peaks” in signals. The algorithm of “rough” speed code of signals is developed.*

*Keywords: biologically active point, methods of diminishing of influencing of hindrances on a measuring signal, informatively-measuring system, signals, adaptive algorithm.*

### Вступ

Адаптивне опрацювання стрибкоподібних сигналів може здійснюватися, зокрема, у сейсмозвідці, при оцінюванні акустичної якості приміщення, а також при отриманні параметрів сигналів з точок акупунктури (ТА) людини. В загальному випадку такий підхід впливає на швидкодію вимірювального каналу (ВК), а відповідно і інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), що здійснює таке опрацювання у цілому.

Незважаючи на широке застосування різних підходів у вимірюванні сигналів у описаних вище галузях [1–5], на даний час залишається недостатньо дослідженим питання їх адаптивного опрацювання, а саме кодування наявних у них “піків”, коли інші параметри сигналу отримувати не потрібно.

Виходячи з цього актуальною є проблема створення такої швидкодійної ІВС, що дозволила б здійснювати адаптивне кодування стрибкоподібних сигналів, зокрема з урахуванням наявних у них “піків”, та не записувати у пам’ять ІВС інші дані (не пов’язані з піками) для недопущення її переповнення.

### Постановка задачі досліджень

З метою збільшення швидкодії ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів, шляхом опрацювання тільки наявних “піків” у сигналах, в даній роботі були поставлені наступні задачі:

- провести аналіз стрибкоподібних сигналів для визначення їх інформативних параметрів – “піків” для їх подальшого кодування;
- побудувати алгоритм адаптивного опрацювання стрибкоподібних сигналів з урахуванням наявних “піків” у сигналах;
- розробити алгоритм “грубого” швидкісного кодування сигналів.

### Основна частина

При дослідженні різних типів сеймосигналів (наприклад, рис. 2, рис. 3), сигналів з точок акупунктури, виникає потреба кодування тільки їх “піків” (“піки” відповідають зміні коефіцієнтів відображення сейсмохвилі у товщі землі, а також стану емоційного піднесення у людини), при цьому інші параметри отримувати не потрібно.

У сейсмозвідці можуть розглядатися сигнали [5] (рис.1),



Рис. 1. Один із типів сеймосигналів

що апроксимуються косинусоїдальним імпульсом  $Y4(t) = \pi \cdot q / \tau \cdot \cos(\pi \cdot t / \tau)$  [6] та спадаючою синусоїдою:

$$f3(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq -\tau/2 \\ \pi \cdot q / \tau \cdot \cos(\pi \cdot t / \tau), & \text{при } -\tau/2 < t \leq \tau/2 \\ e^{-bt} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi), & \text{при } t > \tau/2; \end{cases}$$

у середовищі Mathcad, отриманий для даної моделі графік (рис. 2), форма якого

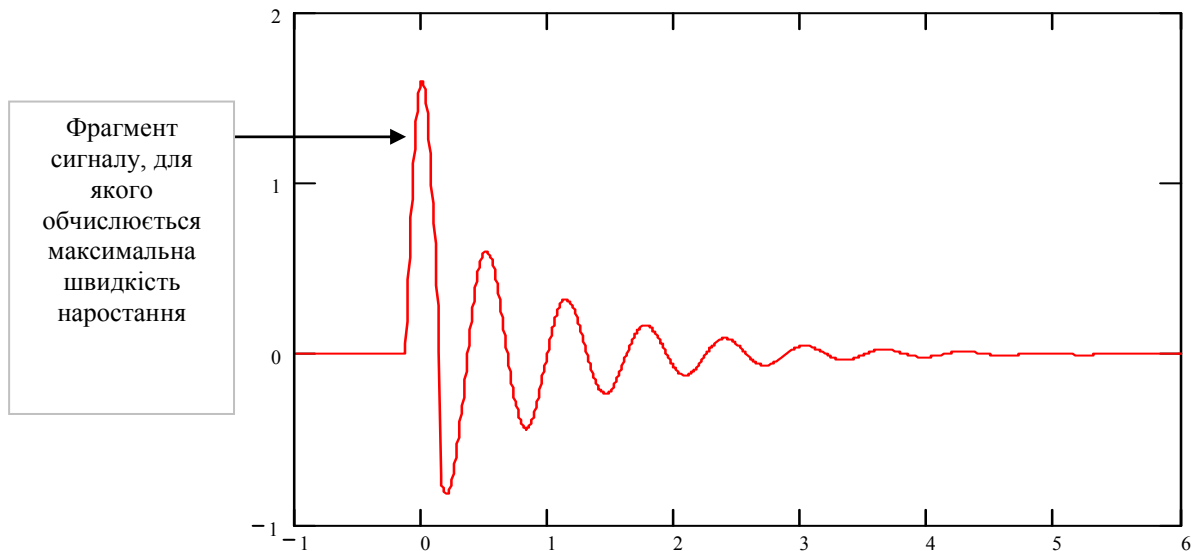


Рис. 2. Графік сейсмосигналу отриманий у середовищі Mathcad

подібна реальному сигналу. При цьому прийемо, що сигнал (рис. 2) є ідентичним одному із видів акустичних сигналів (затухаючому сигналу).

Другий з сейсмосигналів [5] може бути апроксимований подібно до першого трьома сигналами: двома синусоїдами [6] та трикутним імпульсом:

$$f2(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi), & \text{при } t \leq -\tau/2 \\ h \cdot (1 + 2 \cdot t / \tau), & \text{при } -\tau/2 < t \leq 0 \\ h \cdot (1 - 2 \cdot t / \tau), & \text{при } 0 < t \leq \tau/2 \\ A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi), & \text{при } t > \tau/2, \end{cases}$$

де  $A$  – амплітуда сигналу. При цьому у середовищі Mathcad, отриманий графік (рис. 3), форма якого подібна реальному сигналу.

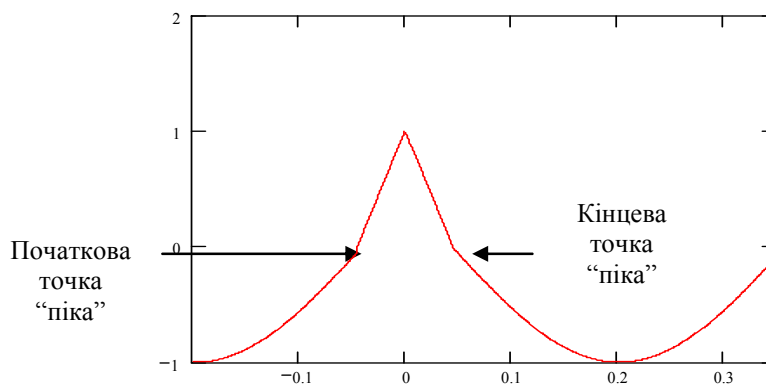


Рис. 3. Другий тип сейсмосигналу

Тут позначення в умовних одиницях. В даному випадку припустимо, що зображений сигнал є ідентичним сигналу з точок акупунктури.

Швидкість змінення сигналу  $V_{\text{поч.кодув.}}$ , що відповідає початку кодування "піка" (рис. 3) може бути отримана за допомогою математичної статистики [7]; початкова та кінцева точки "піка" можуть визначатися експертом, що здійснює відповідне дослідження. При цьому потрібно діяти згідно такого алгоритму

(припустимо, що закон розподілу щільності ймовірності  $V_{\text{поч.кодув.}}$  є нормальним):

1. На основі експериментальних даних для початку “піка” обчислити значення  $V_{\text{поч.кодув.}}$  як похідну

$$f_2(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_1), & \text{при } t \leq -\tau/2 \\ h \cdot (1 + 2 \cdot t / \tau), & \text{при } -\tau/2 < t \leq 0 \\ h \cdot (1 - 2 \cdot t / \tau), & \text{при } 0 < t \leq \tau/2 \\ A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_1), & \text{при } t > \tau/2, \end{cases}$$

$f'(t) = \frac{df}{dt}$  на проміжку  $-\tau/2 < t \leq 0$ , що описує одну сторону “піка”;  $V_{\text{поч.кодув.}} = f'(t) = 2h/\tau$ .

Також можливий розрахунок  $V_{\text{поч.кодув.}}$  як

$$V_{\text{поч.кодув.}} = Hh/t_i,$$

що являє собою відношення приросту рівня сигналу  $Hh$  за час  $t_i$ ;  $t_i$  – можна визначити як час перетворення (одного циклу перетворення) АЦП у складі ІВС.

2. Сформувати генеральну та вибірккову сукупності спостережень (обчислень) різних значень  $V_{\text{поч.кодув.}}$ , обчислити обсяг вибіркової сукупності для забезпечення її репрезентативності.

3. Обчислити середнє арифметичне значень  $V_{\text{поч.кодув.}}$ , прийняти його за умовну норму швидкості –  $V_{\text{поч.кодув.н.}}$ , що визначає початок кодування “піка”.

4. Обчислити оцінки середньоквадратичного відхилення  $V_{\text{поч.кодув.н.}}$ .

5. Провести оцінювання аномальності результатів спостережень і виключити аномальні результати із вибіркової сукупності.

6. Перевірити відповідність експериментально визначеного розподілу результатів спостережень із нормальним.

7. Обчислити довірчі межі математичного очікування  $V_{\text{поч.кодув.н.}}$  при заданій довірчій імовірності.

8. Визначити верхню  $V_{\text{поч.кодув.макс}}$  та нижню  $V_{\text{поч.кодув.мін}}$  межі допустимих значень  $V_{\text{поч.кодув.}}$ , як довірчі інтервали, що покривають математичне очікування.

В результаті зазначених дій отримують нерівність

$$V_{\text{поч.кодув.мін}} \leq V_{\text{поч.кодув.}} \leq V_{\text{поч.кодув.макс}}$$

що описує діапазон змінення швидкості вхідного сигналу, яка відповідає появи у ньому “піка”.

Враховуючи представлене вище, пропонується адаптивний алгоритм кодування “піків” за допомогою ІВС:

1. Обчислення у цифровому обчислювальному пристрої системи при її вмиканні поточної швидкості змінення сигналу  $V_{\text{пот.кодув.}}$  згідно першого пункту попередньо наведеного алгоритму.

2. Порівняння  $V_{\text{пот.кодув.}}$  із нижньою межею  $V_{\text{поч.кодув.мін}}$  згідно зазначеної вище нерівності. Якщо  $V_{\text{пот.кодув.}} \geq V_{\text{поч.кодув.мін}}$ , то здійснюється запис виміряних рівнів сигналів у відповідну пам'ять ІВС, наприклад у апарат цифрового запису (АЦЗ), також здійснюється поточне обчислення швидкості, в інших випадках – дані не записуються та здійснюється перехід до пункту 1.

3. Завершення кодування “піка” та завершення запису виміряних даних у пам'ять АЦЗ, коли  $|V_{\text{пот.кодув.}}| \leq V_{\text{поч.кодув.мін}}$ .

Третій пункт алгоритму визначає швидкість наприкінці процесу кодування “піка”, припустимо, що вона дорівнює за модулем швидкості на початку кодування “піка”. Запропонований алгоритм дозволяє вимірювати при потребі тільки “піки” у стрибкоподібних сигналах та не переповнювати блок пам'яті ІВС внаслідок відсутності запису у нього іншої інформації (окрім тої, що стосується “піків”).

Додатково до описаного вище необхідно відмітити ситуацію, коли у режимі реєстрування розроблюваної ІВС потрібно визначати відхилення рівня сигналу, він позначається параметром  $Hh$  від верхньої границі  $Hh_{\text{Nmax}}$  встановленого допустимого діапазону його значень. В даному випадку немає необхідності здійснювати повний цикл врівноваження вхідного стрибкоподібного сигналу  $\Delta v_x$ , а достатньо, що пропонується, здійснити “грубе” (швидкісне, прискорене) перетворення за допомогою старших розрядів АЦП; алгоритм наведений на рис. 4. Суть його полягає у закінченні кодування  $\Delta v_x$ , коли залишається включеним перший старший розряд (згідно класичного алгоритму порозрядного врівноваження) або група розрядів, ваги  $Q'_i$  яких задовольняє нерівності

$$\sum_0^p Q'_i \geq Hh_{N_{max}}$$

Це дає можливість підвищити швидкодію вимірювань за рахунок переривання основного перетворення і при цьому не отримувати точне значення рівня сигналу, а виявити тільки факт наявності  $Hh$  за верхньою межею  $Hh_{N_{max}}$ . Це у свою чергу дозволяє зменшити кількість записаної інформації у пам'яті ІВС (факт виходу  $Hh$  за межу  $Hh_{N_{max}}$  позначати як  $P=0$ ) для недопущення її переповнення.

**Висновки**

Таким чином, запропоновані алгоритми дозволяють здійснювати швидкісне адаптивне кодування стрибкоподібних сигналів, зокрема з урахуванням наявних у них "піків", та не записувати у пам'ять ІВС інші дані окрім інформативних "піків" для недопущення її переповнення.

**Література**

1. Ando Y. Concert hall acoustics. Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 2005.
2. Азаров О. Д. Вимірювальна система для оцінювання активності точок акупунктури людини у стаціонарних та нестаціонарних умовах / О. Д. Азаров, А. В. Снігур // Вісник ВПІ. – Вінниця, 2006. – № 1. – С. 62 – 77.
3. Колесников А. Е. Акустические измерения / Колесников А. Е. – Л.: "Судостроение", 1983. – 240 с.
4. Рейхард В. Акустика общественных зданий / Рейхард В.; пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1984. – 355 с.
5. Хмелевской В. К. Краткий курс разведочной геофизики / Хмелевской В. К. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 154 с.
6. Харкевич А. А. Спектры и анализ / Харкевич А. А. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 236 с.
7. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений / Яноши Л.; пер. с англ. – М.: МИР, 1965. – 462 с.

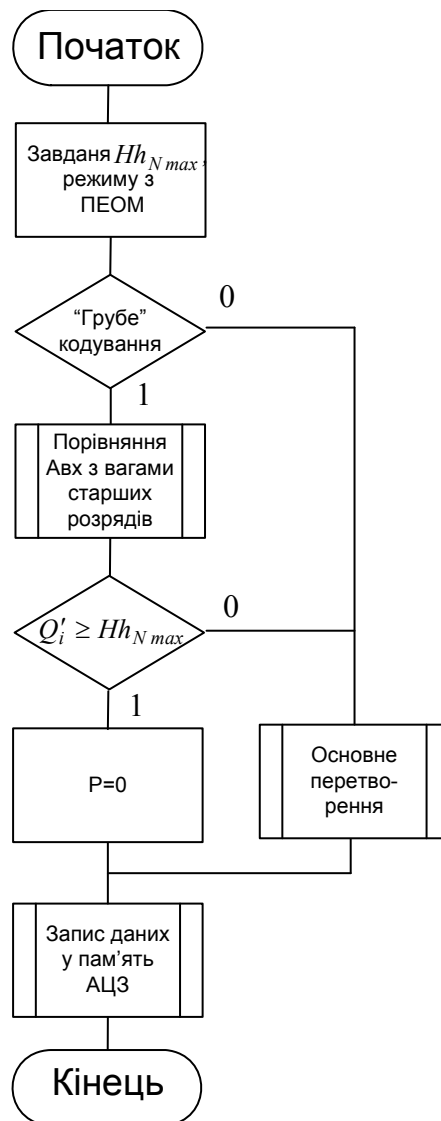


Рис. 4. Алгоритм "грубого" кодування сигналу

**References**

1. Ando Y. Concert hall acoustics. Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 2005.
2. Azarov O. D., Snigur A. V. Vимірювальна система dlya otslnyuvannya aktivnosti tochk akupunkturi lyudini u statsionarnih ta nestatsionarnih umovah // Vіsник VPI. – Vinnitsya; 2006. – N1. – S 62 – 77.
3. Kolesnikov A. E. Akusticheskie izmereniya. – L.: "Sudostroenie", 1983. – 240 s.
4. Reyhard V. Akustika obschestvennyih zdaniy / per. s nem. – M.: Stroyizdat, 1984. – 355 s.
5. Hmelevskoy V. K. Kratkiy kurs razvedochnoy geofiziki. M.: Izd-vo MGU. – 2005. – 154 s.
6. Harkevich A. A. Spektry i analiz. – M.: GIFML, 1962. – 236s.
7. Yanoshi L. Teoriya i praktika obrabotki rzultatov izmereniy: Per. s angl. – M.: MIR, 1965. – 462 s.

Рецензія/Peer review : 12.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Перевозніков С. І.

## ЄМНІСНІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ СТИБІЙ АБО БІСМУТВМІСНИХ ДІОКСИМАТІВ НІКОЛУ (II)

Створено ємнісні елементи, в яких вологочутливий шар виготовлений на основі стибій або бісмутвмісних діоксиматів ніколу (II). Експериментально доведено, що природа гетерометалевої комплексної сполуки суттєво впливає на чутливість сенсора вологості. Встановлено, що в діапазоні вологості  $7 \div 27\%$  найчутливішим є ємнісний елемент, виготовлений на основі стибійвмісного діоксимату ніколу (II), що містить два атома стибію, чутливість якого складає  $285 \text{ pF}/\%$ . В діапазоні вологості  $75 \div 95\%$  спостерігається різке зростання чутливості сенсорів до  $450 \text{ pF}/\%$  не залежно від співвідношення атомів стибію чи бісмуту до ніколу, які входять до складу гетерометалевих комплексних сполук.

Ключові слова: ємнісний вологочутливий елемент, стибій або бісмутвмісні діоксимати ніколу (II), гетерометалева комплексна сполука, діелектрична проникність, ємність.

A.V. OSADCHUK, L.V. KRYLIK, M.V. EVSEVA

Vinnitsia National Technical University

### CAPACITIVE HUMIDITY SENSORS BASED ON ANTIMONY BISMUTCAPACIOUS DIOKSIMATIV NICOLY (II)

*Abstract - A capacitive elements where humidity layer is made of antimony or bismutcapacious dioximats nicole (II). Experimentally proved that the nature heterometallic complex compound significantly affects the sensitivity of the humidity sensor. Established in humidity range*

*$7 \div 27\%$  is the most sensitive capacitive element is made of stybiycapacious dioximats nicole (II) containing two atoms of antimony, whose sensitivity is  $285 \text{ pF}/\%$ . In the humidity range  $75 \div 95\%$ , a sharp increase in the sensitivity of the sensors to  $450 \text{ pF}/\%$  regardless of the ratio of atoms of antimony or bismuth to nicole, who are part of heterometallic complex compounds.*

*Key words: capacitive humidity element, antimony or bismutcapacious dioximats nicole (II), complex compound heterometallic, dielectric constant, capacitance.*

### Вступ

На теперішній час серед первинних перетворювачів різного типу особливе місце у вимірювальній техніці займають сенсори вологості. Необхідність контролю вологості у промисловості, а також у побуті робить актуальною проблему розроблення і дослідження сенсорів вологості різних типів, принцип дії яких базується на зміні електрофізичних параметрів [1].

Крім того, сучасний стан науки і техніки висуває підвищені вимоги до засобів вимірювання вологості, які пов'язанні із автоматизацією технологічних процесів. Питання вивчення, розроблення і виробництва засобів вимірювання вологості є актуальним, оскільки перетворення рівня вологості в електричний сигнал відомими вимірювальними засобами ускладнене [1 – 3].

Серед великого різноманіття сенсорів вологості значний практичний інтерес набули мікроелектронні сорбційні сенсори вологості. Принцип дії сенсорів цієї великої групи заснований на явищі сорбції вологи з аналізованого середовища. Зміни фізико-хімічних або електрофізичних параметрів чутливого елемента, який знаходиться в гідротермічній рівновазі з середовищем, служать мірою для визначення вмісту вологи в середовищі.

В залежності від виду і механізму сорбції можна виділити адсорбційні, абсорбційні і хемосорбційні сенсори вологості. У перших двох різновидах сорбція парів води відбувається на непористій поверхні сорбенту або на поверхні пор – пористого. У сенсорах абсорбційного типу поглинання вологи здійснюється всім об'ємом сорбенту. У хемосорбційних сенсорах сорбована вода вступає в хімічну реакцію взаємодії з матеріалом сорбенту. У сенсорах адсорбційного та абсорбційного типів поглинання або виділення вологи сорбентом супроводжується зміною його маси та електрофізичних характеристик – електропровідності, діелектричної проникності тощо. Серед матеріалів, що використовуються як сорбенти, можна виділити неорганічні – іоноутворювальні (гігроскопічні солі, кислоти, основи) та іононеутворювальні (оксиди металів), органічні і змішані [4].

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості, спростити схеми подальшої обробки інформації. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів. Він забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність та низьку вартість при використанні мікроелектронної технології, яка дозволяє розробляти ємності планарного типу тонкоплівковим методом. Завдяки чому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента, можливість імплементації на кристалі спеціалізованої інтегральної схеми обробки сигналу [5]. Отже, для вимірювання вологості ємнісний метод є одним із найкращих.

Проте дослідження ємнісних властивостей вологочутливих елементів на основі органічних, неорганічних та змішаних сорбентів виконані не в повній мірі, що дає поштовх для подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

### Теоретичні та експериментальні дослідження

Метою дослідження є розробка нового ємнісного вологочутливого елемента з широким діапазоном

роботи в навколишньому середовищі. Оскільки, ємність сенсора прямопропорційна діелектричній проникності матеріалу, то для матеріалів, які являють собою складні суміші, необхідно врахувати їх структурні властивості та характер розподілу компонентів в них.

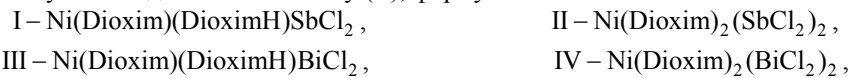
Встановлено, що всі суміші в залежності від розподілу компонентів можна поділити на три типи:

- структуровані, у яких компоненти створюють деякі упорядковані структури;
- матричні, в яких одні компоненти являють собою суцільну матрицю з вкрапленнями інших компонентів;
- статичні, в яких компоненти розподілені хаотично і рівномірно за взаємним розташуванням.

В деяких випадках тип суміші залежить від об'ємного вмісту компонентів. Діелектричні властивості матеріалу в багатьох випадках залежать не від зміни структури, а від вмісту вологи, що знаходиться в даному матеріалі. Формою зв'язку між водою і матеріалом визначається вплив вмісту води на діелектричні властивості матеріалу [6].

Раніше нами досліджено ємнісні вологочутливі елементи, створені на основі гігроскопічних солей NaCl та BaCl<sub>2</sub>. Основним недоліком вологочутливих шарів вищеназваних елементів є те, що вони здатні працювати тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси. Подальші дослідження ємнісних вологочутливих елементів на основі гігроскопічних солей показали, що створення захисного полімерного покриття з метою запобігання випадіння точки роси зменшує діапазон зміни ємності [7].

Для вирішення цієї проблеми, як вологочутливий шар, використано гетерометалеві комплексні сполуки – стибій або бісмутвісні діоксиди ніколу (II), формули яких позначимо I – IV:



де  $\text{DioximH}_2 = \text{H}_3\text{C} - \text{C}(\text{NOH}) - \text{C}(\text{NOH}) - \text{CH}_3$ .

Гетерометалеву комплексну сполуку I отримано за такою методикою: до суміші 2,89 г (10 ммоль) біс-диметилглюксимату ніколу (II) і 2,29 г (10 ммоль) стибій (III) хлориду додавали 60 мл хлороформу і при безперервному перемішуванні нагрівали на водяній бані (~ 50 °C) до розчинення вихідних речовин. При цьому утворювався розчин темного кольору з якого під час охолодження випадав однорідний мілкокристалічний осад бузкового кольору, який фільтрували на скляному фільтрі, промивали невеликою кількістю хлороформу і висушували у вакуум-ексикаторі над силікагелем.

В такий же спосіб при взаємодії біс-диметилглюксимату ніколу (II) з стибій (III) хлоридом у співвідношенні 1 : 2 отримали комплексну сполуку II.

Бісмутвісні комплекси III і IV отримано за аналогічною методикою з використанням в якості вихідних речовин біс-диметилглюксимату ніколу (II) і бісмут (III) хлориду у співвідношенні 1 : 1 або 1 : 2. Склад, будова та фізико-хімічні властивості комплексних сполук I – IV доведено на основі даних елементного, рентгенофазового аналізів, магнетохімічного, ІЧ-спектроскопічного і термогравіметричного досліджень. Для виділених сполук на основі проведених досліджень запропоновано таку схему розміщення хімічних зв'язків (рис. 1) [8]:

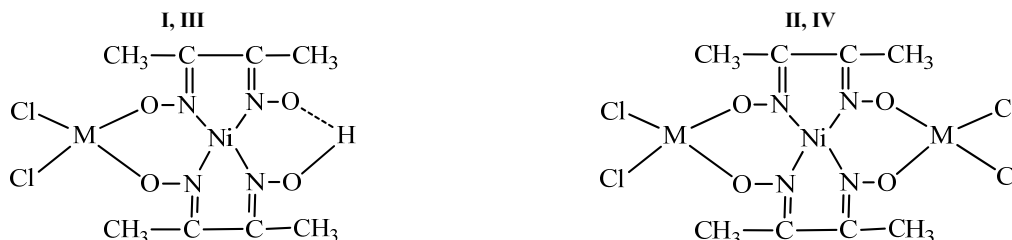


Рис. 1. Схема розміщення хімічних зв'язків в гетерометалевих комплексних сполуках I – IV: M = Sb для I, II; M = Bi для III, IV

Дослідження електричних властивостей виділених сполук I – IV в спресованому вигляді показало, що вони є діелектриками за кімнатної температури. Отримані гетерометалеві комплексні сполуки I – IV практично нерозчинні в спиртах, ацетоні, бензині, погано розчинні в диметилформаміді і диметилсульфоксиді та є гігроскопічними і здатні змінювати забарвлення із зміною відносної вологості навколишнього середовища.

Характерним у нашому випадку для зволоженого матеріалу є те, що сухий компонент (гетерометалева комплексна сполука) і вода знаходяться у вигляді суміші проміжного типу, властивості якої задовільно описуються емпіричним рівнянням [6]:

$$\lg \varepsilon = V_1^a \lg \varepsilon_1 + (1 - V_1^a) \lg \varepsilon_2, \quad (1)$$

де  $V_1$  – об'ємна доля сухого компоненту (гетерометалевої комплексної сполуки);

$$a = 0,5 \div 1;$$

$\varepsilon_1$  – діелектрична проникність гетерометалевої комплексної сполуки;

$(1 - V_1^a)$  – об'ємна доля води;

$\varepsilon_2$  – діелектрична проникність води.

Змінюючи коефіцієнт  $a$  дане рівняння можна застосувати для усіх типів неупорядкованих сумішей. Чисельне значення діелектричної проникності гетерометалевих комплексних сполук (I – IV)



визначено на основі формули Клаузіуса – Москотті [9, 10].

В нашому випадку загальний вираз для визначення діелектричної проникності суміші проміжного  $\varepsilon_{СПТ}$  типу має вигляд:

$$\lg \varepsilon_{СПТ} = V_{доля К.С.}^a \lg \varepsilon_{К.С.} + k(1 - V_{доля К.С.}^b) \chi \lg \varepsilon_{H_2O}, \quad (2)$$

де  $V_{доля К.С.}$  – об'ємна доля комплексної сполуки;

$\varepsilon_{К.С.}$  – діелектрична проникність комплексної сполуки;

$k = 1 \div 5$ ;

$b = 0,5 \div 1$  при умові, що  $a < b$ ,

$\chi$  – величина, яка враховує зв'язок між масовим відношенням води і тиском пари [11];

$\varepsilon_{H_2O}$  – діелектрична проникність води;

Об'ємну долю комплексної сполуки  $V_{доля К.С.}$  визначимо за виразом:

$$V_{доля К.С.} = \frac{S_M \sigma_{К.С.}}{\left( S_M \sigma_{К.С.} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}} \right)}, \quad (3)$$

де  $S_M$  – площа меандру, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{К.С.}$  – товщина нанесеного шару комплексної сполуки, мкм;

$G$  – маса сухого повітря, г [11];

$\rho_{H_2O}$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

Величину  $\chi$  обчислимо за таким виразом:

$$\chi = \delta \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P(T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P(T - T_w))} \right), \quad (4)$$

де  $\delta = \frac{M_{H_2O}}{M_{П}}$  – відносна маса водяної пари по відношенню до сухого повітря при однакових тисках і температурах [11];

$M_{H_2O} = 18,015$  – молярна маса водяної пари, г/моль [11];

$M_{П} = 29$  – молярна маса сухого повітря, г/моль [11];

$p_s$  – тиск насиченої пари при температурі  $T$ , Па;

$A$  – психрометрична стала, яка при  $T_w = 20$  °С становить 0,00064;

$P$  – тиск повітря 101325 Па, або 101,325 кПа (760 мм рт. ст.);

$T$  – температура навколишнього середовища, °С;

$T_w$  – температура вологого термометра, °С;

Масу сухого повітря  $G$  визначимо за виразом:

$$G = \frac{273,2 \cdot M_{П} \cdot P \cdot V}{101,325 \cdot 22,4(273,2 + T)} = \frac{0,1204 \cdot M_{П} \cdot P \cdot V}{273,2 + T}, \quad (5)$$

де  $V$  – об'єм, який займає дана маса газу, дм<sup>3</sup>;

З врахуванням (3), (4) і (5) вираз (2) набуває вигляду:

$$\lg \varepsilon_{СПТ} = \left( \frac{S_M \sigma_{К.С.}}{S_M \sigma_{К.С.} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \lg \varepsilon_{К.С.} + k \left( 1 - \left( \frac{S_M \sigma_{К.С.}}{S_M \sigma_{К.С.} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \times \delta \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \lg \varepsilon_{H_2O} \quad (6)$$

Ємнісний сенсор вологості виготовлений на ситаловій підкладці розміром 0,7×0,9 мм, на поверхні якої нанесена плівка міді, яка утворює обкладки конденсатора у вигляді меандру з відповідною геометрією 7,85·10<sup>-2</sup>×150·10<sup>-6</sup>×1,2·10<sup>-6</sup> м. Вологочутливі шари створювали використовуючи розведені диметилформамідні розчини гетерометалевих комплексних сполук I – IV методом пульверизації.

Для розрахунку ємності такої структури скористаємось формулою для визначення ємності тонкоплівкового конденсатора з гребінцевою структурою [12]:

$$C = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_{П} + 1) \cdot l \cdot [2A_1(N - 1) + A_2], \quad (7)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала вакууму, Ф/м;

$\epsilon_{II}$  – діелектрична проникність підкладки;

$$A_1 = 0,61(d_{II} / a)^{0,25} (b / d_{II})^{0,44} ;$$

$d_{II}$  – товщина підкладки, мм;

$l, a, b$  – величини, які враховують геометрію конденсатора, мм;

$N$  – число секцій;

$$A_2 = 0,77b / [(2N - 1)(a + b)] + 0,41 .$$

Врахуємо діелектричну проникність комплексної сполуки (6) у формулі ємності конденсатора (7):

$$C = (\epsilon_{II} + \epsilon_{СПТ} + 1)\epsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2], \tag{8}$$

де  $A_1 = 3(d_{II} / a)^{0,25} (b / d_{II})^{0,44} .$

Тобто

$$C = \left( \left( \frac{S_M \sigma_{К.С.}}{S_M \sigma_{К.С.} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \lg \epsilon_{К.С.} + \epsilon_{II} + 1 + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \times \right. \\ \left. \times \left( 1 - \left( \frac{S_M \sigma_{К.С.}}{S_M \sigma_{К.С.} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \lg \epsilon_{H_2O} \right) \epsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2]. \tag{9}$$

Згідно виразу (9) розраховано ємність вологочутливого ємнісного елемента для вологочутливих шарів на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV за допомогою пакету прикладних програм «Matlab 7.1». На рис. 2 та рис. 3 подано теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливого елемента на основі комплексних сполук від відносної вологості повітря в діапазоні 7 ÷ 27% та 30 ÷ 95% відповідно.

Експериментальні дослідження показали, що в діапазоні вологості від 7 до 27% найчутливішим є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію, чутливість якого складає 285 pF/%. В діапазоні відносної вологості 30 ÷ 75% залежність ємності від відносної вологості практично лінійна, а чутливість набуває значення 135 pF/%. Що стосується діапазону 75 ÷ 95%, то спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 pF/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV.

Як видно із графіка, теоретичні та експериментальні залежності мають добрий збіг. Адекватність математичної моделі можна оцінити за допомогою відносної похибки, яка складає ± 3,5%.

### Висновки

Запропоновано ємнісний вологочутливий елемент на основі стибій або бісмутвмісних діоксиматів ніколу (II). Розроблено математичну модель, яка описує залежність ємності сенсора гребінцевої структури виготовленого на

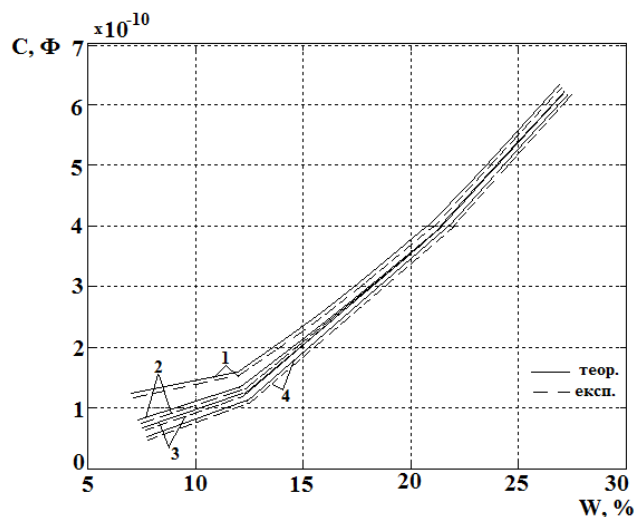


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 7 ÷ 27% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II

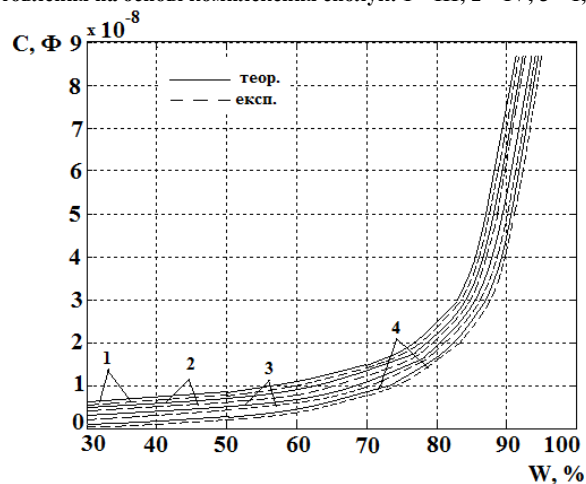


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 30 ÷ 95% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II

основі стибій або бісмутвмісних геторометалевих комплексних сполук ніколу (II) від кількості адсорбованої водяної пари.

Встановлено, що в діапазоні вологості  $7 \div 27\%$  найчутливішим є ємнісний елемент виготовлений на основі стибійвмісного діоксиду ніколу (II), що містить два атома стибію, чутливість якого складає  $285 \text{ pF}/\%$ . В діапазоні  $75 \div 95\%$  спостерігається різке зростання чутливості сенсорів до  $450 \text{ pF}/\%$  не залежно від співвідношення атомів стибію чи бісмуту до ніколу, які входять до складу геторометалевих комплексних сполук.

Проведені експериментальні дослідження залежності ємності сенсора від відносної вологості навколишнього середовища показали, що розбіжність теоретичних і експериментальних кривих складає  $\pm 3,5\%$ .

### Література

1. Подлепецкий Б. И. Микроэлектронные датчики влажности / Б. И. Подлепецкий, А. Б. Симаков // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника. – 1987. – № 2(309). – С. 64–97.
2. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24–26.
3. Сенсори вологості : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – 208 с.
4. Бутурлин А. И. Микроэлектронные датчики влажности / А. И. Бутурлин, С. А. Крутоверцев, Ю. Д. Чистяков // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника. – 1984. – № 9. – С. 3–54.
5. Маргелов А. Датчики влажности компании Honeywell / А. Маргелов // Chip News. – 2005. – № 8(101). – С. 40–42.
6. Бугров А. В. Высоочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества / А. В. Бугров. – М. : Машиностроение, 1982. – 94 с.
7. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.
8. Гандзий М. В. Сурьму- или висмутсодержащие диоксиды никеля (II) или меди (II) / М. В. Гандзий, В. И. Цапков, Н. М. Самусь // Журнал неорганической химии. – 1991. – Т. 36, вып. 9. – С. 2297–2300.
9. Верещагин А. Н. Поляризуемость молекул / А. Н. Верещагин. – М. : Наука, 1980. – 177 с.
10. Вилков Л. В. Физические методы исследования в химии / Л. В. Вилков, Ю. А. Пентин. – М. : Высшая школа, 1987. – 376 с.
11. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 424 с.
12. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем : учебн. пособие [для вузов] / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1983. – 232 с.

### References

1. Podlepetsky B. I. Microelectronic humidity sensors / B. I. Podlepetsky, A. B. Simakov // Collection of reviews. Foreign electronic appliances. – 1987. – № 2 (309). – P. 64–97.
2. Babayan R. R. Transducers non-electrical quantities with frequency output / R. R. Babayan // Devices and control systems. – 1996. – № 11. – P. 24–26.
3. Sensors humidity : monografiya [Text] / [V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylik]. – Vinnitsa "UNIVERSUM – Vinnitsa", 2003. – 208 p.
4. Buturlin A. I. Microelectronic humidity sensors / A. I. Buturlin S. A. Kroutovtsev, Y. D. Chistyakov // Collection of reviews. Foreign electronic appliances. – 1984. – № 9. – P. 3–54.
5. Margelov A. Humidity sensors of Honeywell / A. Margelov // Chip News. – 2005. – № 8 (101). – P. 40 – 42.
6. Bugrov A. V. High capacitive transducers and instruments for quality control / A. V. Bugrov. – M : Mechanical Engineering, 1982. – 94 p.
7. Osadchuk V. S. Capacitive humidity sensor comb structures based on polymeric materials / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, L. V. Krylik, M. V. Evseeva // Opto-Electronic Information and communication technology. – 2006. – № 2 (12). – P. 222–227.
8. Gandziy M. V. Antimony or bismuth dioksimidny nickel (II) or copper (II) / M. V. Gandziy, V. I. Tsapkov, N. M. Samus // Journal of Inorganic Chemistry. – 1991. – V. 36, – № 9. – P. 2297–2300.
9. Vereshchagin A. N. Polarizability of molecules / A. N. Vereshchagin. – Moscow : Nauka, 1980. – 177 p.
10. Vilkov L. V. Physical Methods in Chemistry / L. V. Vilkov, Y. A. Pentin. – Moscow : Higher School, 1987. – 376 p.
11. Ash J. sensors measuring systems / J. Ash. – Moscow : Mir, 1992. – 424 p.
12. Berezin A. S. Technology and design of integrated circuits : Training. manual [for University] / A. S. Berezin, A. R. Mochalkina. – Moscow : Radio and communication, 1983. – 232 p.

Рецензія/Peer review : 10.2.2015 р.

Надрукована/Printed : 25.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М

## СТРУКТУРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНДУКТОСИНА

Рассмотрены вопросы формирования структуры микроконтроллерного измерителя перемещения с использованием индуктосина в качестве датчика положения, на основе функционально-структурного подхода, предложенного в работах Е.П. Балашова. В результате декомпозиции целевой функции измерителя формируется дерево функций. Функции 1-го уровня определяют основные показатели измерителя перемещения, такие как производительность, надежность, функциональность и оказывают первоочередное влияние на структуру измерителя. Дополнительные функции 2-го уровня расширяют функциональность измерителя перемещения. Приведены результаты синтеза структуры микроконтроллерного измерителя перемещения на основе предложенного дерева функций.

Ключевые слова: дерево функций, структура, функционально-структурный подход, микроконтроллер, измеритель перемещения, индуктосин.

N.V.KHRULOV

Cherkasy State Technological University

### THE STRUCTURE OF MCU INDUCTOSYN-BASED MOVEMENT MEASURER

*Abstract – The purpose of this article is the synthesis of the structure of microcontroller movement measurer that used inductosyn as a position sensor. Questions of forming the structure of MCU inductosyn -based movement measurer on the basis of the functional-structural approach proposed in the works of E.P.Balashov are considered. As a result of the target function of measurer decomposition the functions tree is formed. The functions of the 1st level defines the basic parameters of the MCU inductosyn-based movement measurer, such as performance, reliability, functionality and provide a top-priority influence on the structure of the measurer. Additional functions of the 2nd level enhance the functionality of the movement measurer. The results of the synthesis of the structure of MCU inductosyn-based movement measurer on the basis of the suggested functions tree are produced. The proposed structure can significantly reduce the circuit complexity of movement measurer, increase reliability and reduce the cost of the final product.*

*Keywords: functions tree, structure, functional-structural approach, microcontroller, movement measurer, inductosyn.*

### Постановка проблемы

Система ЧПУ предназначена для получения детали заданной формы с заданной точностью в результате автоматизированного точечного взаимодействия между инструментом и предметом обработки [1]. Обеспечение выполнения целевой функции системой ЧПУ существенным образом зависит от типа применяемого датчика положения и, соответственно, измерителя перемещения.

В качестве датчиков положения наибольшее распространение получили индуктосины, вращающиеся трансформаторы (ВТ), сельсины, а также оптические датчики [2, 3]. По состоянию на сегодня все перечисленные типы датчиков положения выпускаются промышленностью. Следует отметить, что наряду с перечисленными типами датчиков положения создаются новые, например, на основе лазеров [4].

Информация, получаемая от датчика положения, обрабатывается измерителем перемещения. На структурные, схемотехнические и программные решения при разработке измерителей перемещения в первую очередь оказывает влияние тип датчика положения, также существенно влияют достижения в области микроэлектроники и вычислительной техники.

Известны измерители перемещения, выполненные на основе микроконтроллеров. Однако, в научно-технической периодике недостаточно отражены решения по усовершенствованию измерителей перемещения, в том числе с использованием в качестве датчика положения индуктосина. Таким образом, проблема разработки новых измерителей перемещения, соответствующих современному уровню развития микроэлектроники и вычислительных средств и выполняющих расширенный набор функций, актуальна и представляет определенный научный и практический интерес.

### Анализ последних исследований и публикаций.

Характеристики датчиков положения приведены в [2–4]. В [5] приведено техническое описание модулей, входящих в состав измерителя перемещения системы ЧПУ 2С42—65 с использованием датчика положения типа индуктосин. По состоянию на сегодня, широкое распространение получают устройства, выполненные с применением микроконтроллеров [6, 7]. Вариант следящего электропривода на основе микроконтроллера с использованием датчика положения типа синусно-косинусный вращающийся трансформатор описан в [8].

### Цель статьи

Целью данной статьи является синтез структуры микроконтроллерного измерителя перемещения с использованием индуктосина в качестве датчика положения, соответствующего современному уровню развития микроэлектроники и вычислительных средств, за счет чего обеспечивается повышение надежности, снижение потребляемой мощности, снижение стоимостных и массогабаритных характеристик измерителя.

### Изложение основного материала

При разработке измерителей перемещения, с одной стороны, должен учитываться имеющийся

научно-технический задел, с другой стороны, необходимо шире применять новейшие технологии, создающие новые свойства измерителей перемещения, ранее недоступные. Одним из таких направлений, например, может быть применение микроконтроллеров разного уровня сложности [6, 7], что, в свою очередь, позволит расширить набор функций выполняемых измерителем перемещения.

Измерение перемещений с использованием датчика положения типа индуктосин основано на измерении фазы между питающим напряжением и напряжением, снятым с подвижной измерительной катушки. Измеренное значение фазы пропорционально линейному или угловому перемещению, в зависимости от типа применяемого индуктосина.

Для измерения перемещений в ЧПУ 2С42—65 используются следующие блоки:

SB-453 блок генератора опорных частот;

SB-455 блок питания датчиков типа индуктосин;

SB-457 блок оцифровки сигналов, поступающих с датчика типа индуктосин.

Блок SB-453 служит для генерирования опорных частот 10 МГц, 5 МГц, 2,5 МГц и 2,5 кГц. Частота 10 МГц формируется кварцевым генератором, остальные частоты получают делением. Частоты 10 МГц, 5 МГц и 2,5 МГц используются для оцифровки сигнала с датчика. Частота 2,5 кГц используется для формирования питающих напряжений датчиков типа индуктосин. Функции данного модуля могут быть реализованы на основе 8-разрядных микроконтроллеров семейства AVR, PIC или подобных.

Питание датчиков типа индуктосин осуществляется двумя напряжениями, реализующими функции  $Asin \omega t$  и  $Acos \omega t$ . В блоке SB-455 выполняется преобразование прямоугольного сигнала частотой 2,5 кГц в сигнал  $Asin \omega t$ , которое выполняется при помощи фильтра низкой частоты 3-го порядка и фильтра-пробки, отсекающих высшие гармоники. Напряжение  $Acos \omega t$  получается из  $Asin \omega t$  при помощи фазосдвигающей цепочки. Затем в блоке SB-455 выполняется усиление полученных напряжений по мощности. Напряжения  $Asin \omega t$  и  $Acos \omega t$  могут быть сформированы при помощи 8-разрядных микроконтроллеров, например, семейства AVR или PIC, с использованием цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) или широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а затем усилены интегральным усилителем мощности, что позволит значительно сократить аппаратные затраты. Также в блоке SB-455 формируется сигнал начала оцифровки при помощи полосового фильтра, аналогового компаратора и одновибратора, срабатывающего по фронту. При помощи микроконтроллера запуск оцифровки может быть выполнен программно, т.е. необходимость в полосовом фильтре, аналоговом компараторе и одновибраторе отсутствует.

Блок SB-457 оцифровки сигналов датчика типа индуктосин выполнен на счетчиках. Также в блоке SB-457 формируется сигнал завершения оцифровки при помощи полосового фильтра, аналогового компаратора и одновибратора, срабатывающего при смене знака сигнала  $Asin(\omega t + \varphi)$  измерительной обмотки датчика с отрицательного на положительное значение. Функции данного модуля также могут быть реализованы на основе 8-разрядных микроконтроллеров, например, семейства AVR или PIC.

В соответствии с функционально-структурным подходом, изложенным в [9] структурная организация системы должна соответствовать ее функциональному назначению и условиям эксплуатации.

Представим измеритель перемещения в виде математического описания:

$$S_{msr} = \langle SS_1(F_1), \dots, SS_i(F_i) \rangle, \quad (1)$$

где  $S_{msr}$  – разрабатываемый измеритель перемещения;

$SS_1(F_1)$  – первая подсистема (subsystem), реализующая набор функций  $F_1$ ;

$SS_i(F_i)$  –  $i$ -я подсистема, реализующая набор функций  $F_i$ .

Каждая подсистема (структурный модуль), в свою очередь, может быть представлена в виде математического описания аналогичного (1) в соответствии с заданным деревом функций.

В соответствии с методологией функционально-структурного подхода [9] и на основе анализа технических материалов по измерителям перемещения [2–5, 8] сформируем дерево функций 1-го и 2-го уровней измерителя перемещения использующего датчик положения типа индуктосин.

Уровень 0.

$F_0$  – функционирование измерителя перемещения обеспечивающего получение детали заданной формы с заданной точностью в результате автоматизированного точечного взаимодействия между инструментом и предметом обработки [1], а также выполнения дополнительных функций.

Функции уровня 1.

На основе материала, изложенного в [2–5, 8], сформулируем функции уровня 1 измерителя перемещения:

$F_1$  – функция сопряжения измерителя перемещения с центральным компьютером системы ЧПУ;

$F_2$  – функция формирования питающих напряжений датчика положения типа индуктосин;

$F_3$  – функция измерения.

Функции уровня 2.

Сформулируем функции уровня 2 измерителя перемещения:

$F1.1$  – функция преобразования уровней сигналов в соответствии с выбранным типом интерфейса;

$F1.2$  – функция вывода информации о перемещении в центральный компьютер системы ЧПУ;

$F2.1$  – функция формирования питающего напряжения синусоидальной формы  $Asin \omega t$ ;

$F2.2$  – функция усиления напряжения синусоидальной формы;

- F2.3 – функция формирования питающего напряжения косинусоидальной формы  $A \cos \omega t$ ;
- F2.4 – функция усиления напряжения косинусоидальной формы;
- F2.5 – функция формирования опорной частоты питающего напряжения;
- F3.1 – функция запуска счета импульсов опорной частоты;
- F3.2 – функция счета импульсов опорной частоты измерителя;
- F3.3 – функция преобразования входного сигнала;
- F3.4 – функция останова счета импульсов опорной частоты;
- F3.5 – функция формирования опорной частоты измерителя.

Для реализации предложенного дерева функций измеритель перемещения должен состоять из следующих подсистем (рис.1):

- SS1 – подсистема сопряжения измерителя перемещения с центральным компьютером системы ЧПУ;
- SS2 – подсистема формирования питающих напряжений датчика положения типа индуктосин;
- SS3 – подсистема измерения.

Подсистема SS1 сопряжения измерителя перемещения с центральным компьютером системы ЧПУ должна состоять из следующих функциональных модулей:

- St1.1 – интерфейсного модуля;
- St1.2 – модуля вывода измеренных координат в центральный компьютер системы ЧПУ.

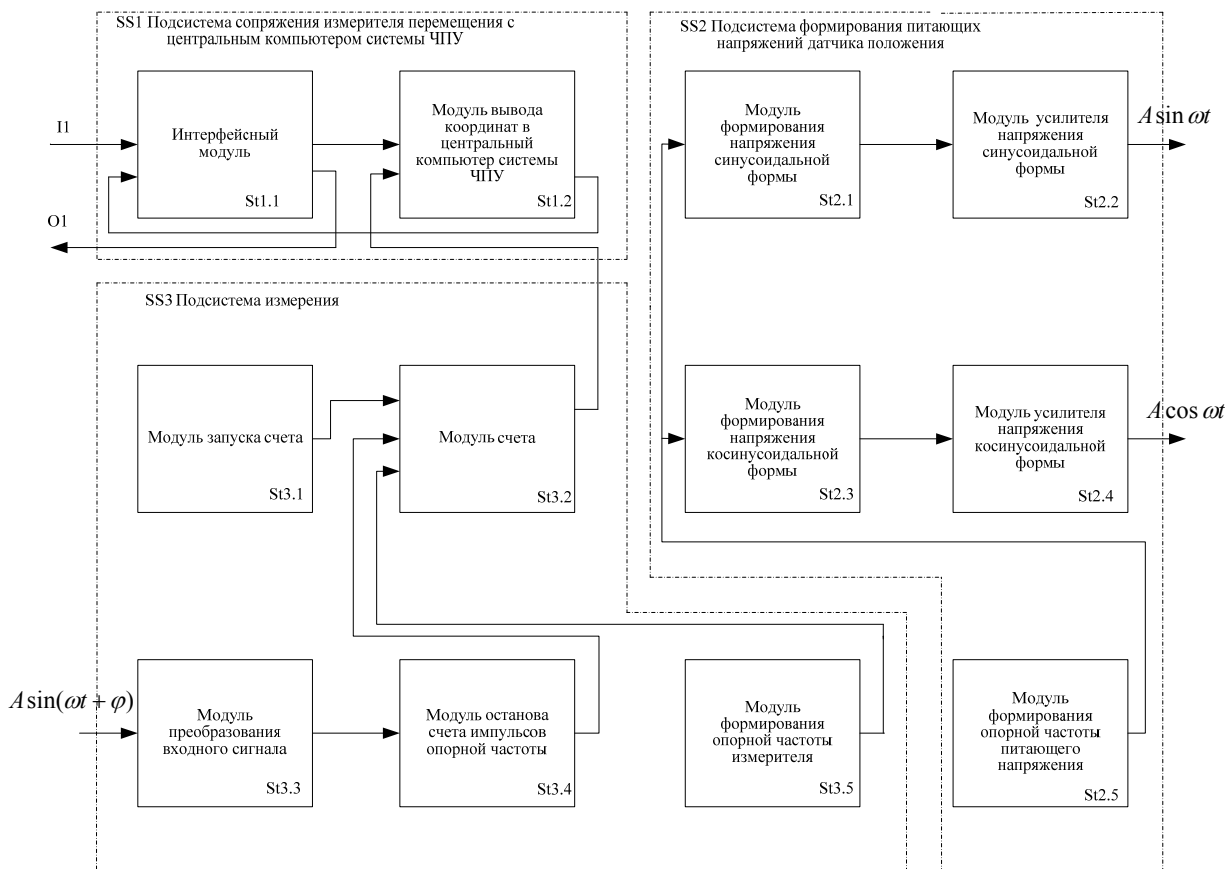


Рис.1. Структура микроконтроллерного измерителя перемещения

Подсистема SS2 формирования питающих напряжений датчика положения типа индуктосин должна состоять из следующих функциональных модулей:

- St2.1 – модуль формирования напряжения синусоидальной формы  $A \sin \omega t$ ;
- St2.2 – модуль усилителя напряжения синусоидальной формы;
- St2.3 – модуль формирования напряжения косинусоидальной формы  $A \cos \omega t$ ;
- St2.4 – модуль усилителя напряжения косинусоидальной формы;
- St2.5 – модуль формирования опорной частоты питающего напряжения.

Подсистема SS3 измерения должна состоять из следующих функциональных модулей:

- St3.1 – модуль запуска счета импульсов опорной частоты;
- St3.2 – модуль счета импульсов опорной частоты;
- St3.3 – модуль преобразования входного сигнала  $A \sin(\omega t + \varphi)$  в сигнал прямоугольной формы;
- St3.4 – модуль останова счета импульсов опорной частоты.
- St3.5 – модуль формирования опорной частоты измерителя.

Представленный измеритель перемещения может быть реализован различными способами [10]. В качестве основного элемента измерителя предлагается использовать микроконтроллер. Стоимость

измерителя зависит от стоимости микроконтроллера и определяется его вычислительной мощностью, объемом оперативной и постоянной памяти, а также наличием необходимых средств ввода-вывода.

Большинство модулей приведенной структуры могут быть реализованы программно на основе микроконтроллера. Некоторые модули могут быть реализованы только аппаратно, например, выполняющие функции сопряжения микроконтроллера с управляющей ЭВМ и датчиками положения.

Функциональность предложенного микроконтроллерного измерителя перемещения можно расширить за счет добавления функции управления перемещением режущего инструмента. В этом случае предложенная структура превратится, по сути, в однокоординатную систему управления следящим электроприводом.

Добавление функции технической диагностики повысит надежность работы как предлагаемого измерителя, так и системы ЧПУ в целом.

### Выводы

В статье выполнен анализ функций измерителей перемещения выполненных на основе датчика положения типа индуктосин. На основании проведенного анализа, а также с учетом современных достижений в области микроэлектроники и вычислительных средств, сформировано дерево функций измерителя перемещения 1-го и 2-го уровней, на основании чего выполнен синтез структуры измерителя перемещения выполненного на основе датчика положения типа индуктосин. Предложенная структура позволяет значительно снизить схемотехническую сложность измерителя перемещения, повысить его надежность и снизить стоимость конечного изделия.

### Литература

1. Кошкин В.Л. Аппаратные системы числового программного управления / В.Л. Кошкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 248 с.
2. Резольверы – преобразователи угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора [Электронный ресурс] / СКБИС. — Режим доступа : <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи перемещений [Электронный ресурс] / СКБИС. — Режим доступа : <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Лазерные датчики перемещения [Электронный ресурс] / СКБИС. — Режим доступа : <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. Устройство 2C42—65: Руководство по эксплуатации 3.035.090 РЭ : часть 1. – 1991. – 84 с.
6. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers [Электронный ресурс] / Atmel Corporation. — Режим доступа : <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx>.
7. STM32 32-bit ARM Cortex MCUs [Электронный ресурс] / Atmel Corporation. — Режим доступа : <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169>.
8. Иванов В.М. Электроприводы с системами числового программного управления : учебное пособие / сост. В.М. Иванов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 152 с.
9. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем / Е.П. Балашов. – М. : Радио и связь, 1985. – 328 с.
10. Рудницкий В.Н. Обоснование выбора аппаратной платформы подсистем устройства ЧПУ / В.Н. Рудницкий, Н.В. Хрулёв // Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления в прикладных задачах : коллективная монография / под ред. Б. Ф. Мельникова. — Ульяновск : ТГУ, 2013. — Вып. 2. — С. 141–153.

### References

1. Koshkin V.L., Hardware CNC system, Mashinostroenie, 1989, 248p.
2. Rezol'very - preobrazovateli uglovyh peremeshhenij na osnove vrashhajushhegosja transformatora SKB IS <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Inkrementnye linejnye fotoelektricheskie preobrazovateli peremeshhenij SKB IS/ <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Lazernye datchiki peremeshhenija SKB IS <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. The CNC 2C42-65, Instruction manual Part 1, 1991, 84 p.
6. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers, Atmel Corporation, <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx>.
7. STM32 32-bit ARM Cortex MCUs, STMicroelectronics, <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169>.
8. Ivanov V.M., Electric drives with CNC systems, tutorial, Ulyanovsk, UlSTU, 2006, 152p.
9. Balashov E.P. Systems evolutionary synthesis, Radio i svjaz, 1985, 328p.
10. Rudnicki V.N., Khrulov N.V. Justification of the choice of hardware platform of the CNC subsystems, Heuristic algorithms and distributed computing in applied problems: Collective monograph, Ed. B.F. Melnikov, Ulyanovsk, TSU, 2013, Vol. 2, pp. 141-153.

Рецензія/Peer review : 21.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.Н. Рудницкий

УДК 681.586.772

О.О. ЛАЗАРЄВ, М.А. ФІЛІНЮК, Л.Б. ЛІЩИНСЬКА, Д.В. БОНДАРІЮК  
Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ L-НЕГАТРОНІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ТА СТІЙКІСТЬ ІНДУКТИВНИХ СЕНСОРІВ

Проведено аналіз чутливості та стійкості індуктивних кіл з L-негатроном. На базі одержаних теоретичних положень розроблені та досліджені схеми індуктивних давачів з L-негатронами. Показано, що давачі, які містять L-негатрон, можуть працювати в режимі автогенерації, а чутливість таких давачів до 10 разів більша у порівнянні з прототипом.

Ключові слова: негатроніка, негасенсор, L-негатрон, чутливість, стійкість.

O.O. LAZAREV, M.A. FILINYUK, L.B. LISHCHYNSKA, D.V. BONDARYUK  
Vinnitsa National Technical University

### STUDY OF L-NEGATRONS THE SENSITIVITY AND STABILITY INDUCTIVE SENSORS

*Abstract - The analysis of sensitivity and resistance inductive circuits with L-negatrons were held. On the basis of the theoretical provisions are designed and tested circuits of inductive sensors with L-negatrons. Determined that the parallel connection of L-negatron scheme is an increase in absolute and relative sensitivities, in the case of cascade L-negatron – only relative sensitivity. It is proved that the presence of negative active resistance and inductance in L-negatron leads to potential instability inductive sensor circuits. It is shown that the instability provide autogeneration to build frequency inductive sensors. Autogeneration condition where determined. It is shown that sensors containing L-negatron can operate in autogeneration and sensitivity of these sensors to 10 times higher compared to the prototype.*

*Keywords: negatronika, negasensor, L-negatron, sensitivity, stability.*

### Вступ

Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності елементів та пристроїв інформаційних систем є використання нової елементної бази, зокрема L-негатронів. L-негатронами називають електронні прилади, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення диференційної індуктивності [1]. Для проектування інформаційних пристроїв на базі L-негатронів необхідні математичні методи, які б враховували особливості цих елементів. Чутливість є одним з основних питань синтезу електронних пристроїв [1]. Індуктивні сенсори застосовуються як первинні джерела інформації для систем автоматичного управління технологічними процесами та для безконтактного виявлення металевих об'єктів, тому набули широкого використання [2]. Використання від'ємної індуктивності дозволяє підвищити чутливість індуктивних сенсорів, так в роботі [3] запропонований індуктивний параметричний сенсор в якому чутливість збільшена в 2,7 разу. В роботі [4] розглянутий індуктивний мостовий сенсор з L-негатроном в якому чутливість збільшена в 3 рази. Однак в цих роботах не досліджено вплив параметрів еквівалентної схеми від'ємної індуктивності на чутливість та виконання умов стійкості/нестійкості схеми. Потенційна-нестійкість пристроїв на базі L-негатронів робить питання чутливості для цих пристроїв ще більш актуальним, внаслідок їх більшої чутливості до зміни різних параметрів елементів схеми. Наявність від'ємної індуктивності та від'ємного активного опору у L-негатронів ставить задачу визначення умов стійкості електронних схем на їх основі.

### Мета роботи та формулювання задач дослідження

Метою роботи є підвищення чутливості індуктивних сенсорів за рахунок використанні L-негатрона. Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються задачі: аналіз впливу L-негатрона на чутливість індуктивних сенсорів, дослідження стійкості індуктивних сенсорів на основі L-негатронів та визначення умов автогенерації.

### Аналіз впливу L-негатрона на чутливість індуктивних сенсорів

Основним параметром L-негатронів є величина від'ємної диференційної індуктивності  $L^{(-)}$ . Можливі два способи включення від'ємної індуктивності в електронне коло: паралельно та послідовно до додатної індуктивності кола  $L$  [5]. Розглянемо чутливість індуктивних сенсорів з урахування еквівалентної схеми індуктивного первинного вимірювального перетворювача (ПВП) та еквівалентної схеми L-негатрона. Для паралельного з'єднання ПВП та L-негатрона еквівалентна схема представлена на рис. 1.

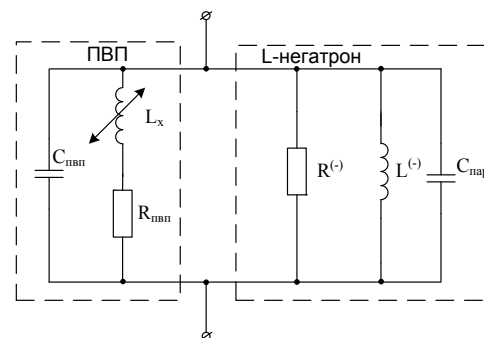


Рис. 1. Еквівалентна схема при паралельному з'єднанні ПВП та L-негатрона. На схемі  $R_{ПВП}$  – активний опір втрат котушки індуктивності,  $C_{ПВП}$  – додатна паразитна ємність,  $L_x$  – індуктивний ПВП,  $R^{(-)}$  – від'ємний активний опір втрат котушки індуктивності,  $L^{(-)}$  – від'ємна індуктивність,  $C_{пар}$  – паразитна ємність L-негатрона



При роботі на частотах, що є менші за максимальну частоту L-негатрона та резонансну частоту ПВП, можна знехтувати впливом паразитної ємності  $C_{ПВП}$  та паразитними елементами L-негатрона.

Повний опір схеми дорівнює  $Z_1 = \text{Re}(Z_1) + j \text{Im}(Z_1)$ , де:

$$\text{Re}(Z_1) = \frac{L^{(-)2} R^{(-)} \omega^2 (R_{ПВП} (R_{ПВП} + R^{(-)}) + L_x^2 \omega^2)}{R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4}, \quad (1)$$

$$\text{Im}(Z_1) = \frac{L^{(-)} R^{(-)2} \omega (R_{ПВП}^2 (R_{ПВП} + L_x (L^{(-)} + L_x) \omega^2)}{R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4} \quad (2)$$

Використовуючи (1) та (2) знайдена абсолютна чутливість дійсної та уявної складової повного опору схеми до зміни індуктивності ПВП:

$$S(\text{Re}(Z_1), L_x) = \frac{2L^{(-)2} R^{(-)2} (L_x R^{(-)} + L^{(-)} (R_{ПВП} + R^{(-)})) \omega^4 (-R_{ПВП} R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega^2)}{(R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)^2},$$

$$S(\text{Im}(Z_1), L_x) = \frac{L^{(-)2} R^{(-)2} \omega^3 (R_{ПВП} a_1 + \omega(a_2 - L^{(-)} L_x \omega))(R_{ПВП} (-R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega(a_2 + L^{(-)} L_x \omega)}{(R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)^2},$$

де  $a_1 = R^{(-)} + L^{(-)} \omega$ ,  $a_2 = (L^{(-)} + L_x) R^{(-)}$ .

Виходячи з отриманих виразів визначена відносна чутливість:

$$S_{L_x}^{\text{Re}(Z_1)} = S(\text{Re}(Z_1), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Re}(Z_1)} = \frac{2L_x R^{(-)} (L_x R^{(-)} + L^{(-)} b_1) \omega^2 (-R_{ПВП} R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega^2)}{b_3 (b_2 + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} b_1^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)}, \quad (3)$$

де  $b_1 = R_{ПВП} + R^{(-)}$ ,  $b_2 = R_{ПВП}^2 R^{(-)2}$ ,  $b_3 = R_{ПВП} b_1 + L_x^2 \omega^2$ .

$$S_{L_x}^{\text{Im}(Z_1)} = S(\text{Im}(Z_1), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Im}(Z_1)} = \frac{L^{(-)} L_x \omega^2 c_1 c_2}{c_3 (R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} c_4)} \quad (4)$$

де  $c_1 = R_{ПВП} (R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega((L^{(-)} + L_x) R^{(-)} - L^{(-)} L_x \omega)$ ,  $c_3 = R_{ПВП}^2 + L_x (L^{(-)} + L_x) \omega^2$ ,  
 $c_2 = R_{ПВП} (-R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega((L^{(-)} + L_x) R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega)$ ,  $c_4 = R_{ПВП} + R^{(-)2} \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4$ .

З отриманих виразів слідує, що включення L-негатрона, паралельно до ПВП призвело до збільшення відносної чутливості в  $\frac{L^{(-)} (L^{(-)} + L_x)^2 R^{(-)2} - L^{(-)3} L_x^2 \omega^2}{(L^{(-)} + L_x)^3 R^{(-)2} + L^{(-)2} L_x^2 (L^{(-)} + L_x) \omega^2}$  разів при умові, що

$$L_x > -\frac{L^{(-)} R^{(-)}}{R^{(-)} + L^{(-)} \omega}.$$

При послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона еквівалентна схема досліджуваної схеми має вигляд (рис. 2).

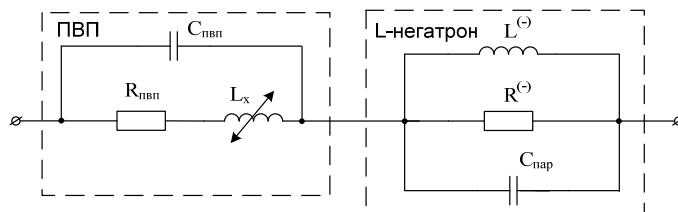


Рис. 2. Еквівалентна схема при послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона

Знехтуємо впливом паразитної ємності  $C_{ПВП}$  та паразитними елементами L-негатрона  $C_{нар}$  за умови роботи схеми на частотах, що є менші за максимальну частоту L-негатрона та резонансну частоту ПВП [6].

Повний опір схеми дорівнює  $Z_2 = \text{Re}(Z_2) + j \text{Im}(Z_2)$ , де:

$$\text{Re}(Z_2) = R_{ПВП} + \frac{L^{(-)2} R^{(-)} \omega^2}{R^{(-)2} + L^{(-)2} \omega^2}; \quad (5)$$

$$\text{Im}(Z_2) = L_x \omega + \frac{L^{(-)} R^{(-)2} \omega}{R^{(-)2} + L^{(-)2} \omega^2}. \quad (6)$$

Використовуючи (5) та (6) знайдені абсолютні чутливості дійсної та уявної складової повного опору до

зміни індуктивності ПВП:  $S(\text{Re}(Z_2), L_x) = 0$ ,  $S(\text{Im}(Z_2), L_x) = \omega$ , а також відносні чутливості:

$$S_{L_x}^{\text{Re}(Z_2)} = S(\text{Re}(Z_2), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Re}(Z_2)} = 0; \tag{7}$$

$$S_{L_x}^{\text{Im}(Z_2)} = S(\text{Im}(Z_2), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Im}(Z_2)} = \frac{L_x(L^{(-)2}\omega^2 + R^{(-)2})}{L_x L^{(-)2}\omega^2 + L^{(-)2}R^{(-)2} + L_x R^{(-)2}}. \tag{8}$$

На основі (8) розрахована залежність відносної чутливості уявної складової схеми при послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона від значення  $L_x$  (рис. 3).

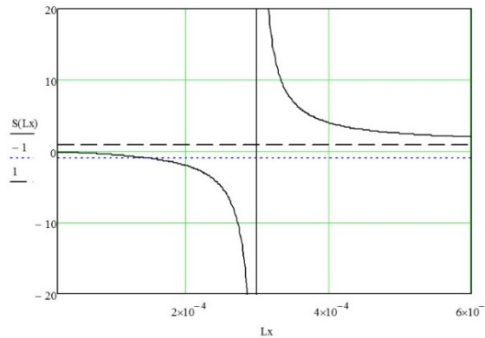


Рис. 3. Залежність відносної чутливості уявної складової від значень  $L_x$

З графіку видно, що відносна чутливість буде більше одиниці при умові  $L_x > -L^{(-)2}R^{(-)2} / 2(L^{(-)2}\omega^2 + R^{(-)2})$ .

**Дослідження стійкості кола індуктивних сенсорів на основі L-негатронів.**

Повна провідність схеми на рис. 1 при умові під'єднання її до генератора струму з внутрішнім опором  $R_g$  буде визначатися виразом:

$$Y = \frac{1}{R_g} + j\omega C_{ПВП} + \frac{1}{j\omega L_x + R_{ПВП}} + \frac{1}{R^{(-)}} + \frac{1}{j\omega L^{(-)}}; \tag{9}$$

Знаменник виразу (9) після заміни  $j\omega$  на  $p$  буде характеристичним рівнянням схеми:

$$-R_g R^{(-)} R_{ПВП} + (-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{ПВП} - L^{(-)} R^{(-)} R_{ПВП}) p - (L^{(-)} L_x R_g + L^{(-)} L_x R^{(-)} + C_{ПВП} L^{(-)} R_g R^{(-)} R_{ПВП}) p^2 + C_{ПВП} L^{(-)} L_x R_g R^{(-)} p^3 = 0 \tag{10}$$

За алгебраїчним критерієм стійкості Рауса-Гурвіца [6], система є стійкою, коли всі коефіцієнти є додатними. Коефіцієнти характеристичного рівняння  $-R_g R^{(-)} R_{ПВП}$  та  $C_{ПВП} L^{(-)} L_x R_g R^{(-)}$  є завжди додатними, а інші можуть бути від'ємними. Визначимо умови, за яких ці коефіцієнти є від'ємними. Якщо:

$$L_x < \frac{-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{ПВП} - L^{(-)} R^{(-)} R_{ПВП}}{R_g R^{(-)}}; R_g < -\frac{L_x R^{(-)}}{L_x + C_{ПВП} R^{(-)} R_{ПВП}},$$

то система є нестійкою і може забезпечити режим автогенерації.

Повний опір схеми на рис. 2 при умові під'єднання її до генератора струму з внутрішнім опором  $R_g$  визначається виразом:

$$Z = R_g + \frac{jL^{(-)}R^{(-)}\omega}{R^{(-)} + jL^{(-)}\omega - C_{нар}L^{(-)}R^{(-)}\omega^2} + \frac{jR_{ПВП} + L_x\omega}{-j + C_{ПВП}\omega(R_{ПВП} + jL_x\omega)}. \tag{11}$$

Знаменник виразу (11) після заміни  $j\omega$  на  $p$  буде характеристичним рівнянням схеми:

$$R^{(-)} + (L^{(-)} + C_{ПВП}R^{(-)}R_{ПВП})p - (-C_{нар}L^{(-)}R^{(-)} - C_{ПВП}L_xR^{(-)} - C_{ПВП}L^{(-)}R_{ПВП})p^2 + (-C_{ПВП}L^{(-)}L_x - C_{нар}C_{ПВП}L^{(-)}R^{(-)}R_{ПВП})p^3 - C_{нар}C_{ПВП}L^{(-)}L_xR^{(-)}p^4 = 0 \tag{12}$$

Коефіцієнти характеристичного рівняння (11)  $L^{(-)} + C_{ПВП}R^{(-)}R_{ПВП}$ ,  $-C_{нар}L^{(-)}R^{(-)} - C_{ПВП}L_xR^{(-)} - C_{ПВП}L^{(-)}R_{ПВП}$  є завжди додатними, а інші коефіцієнти, можуть бути від'ємними але за умови  $L_x < -C_{нар}R^{(-)}R_{ПВП}$ , відповідно схема буде не стійкою [7].

## Висновки

1) Використання L-негатронів дозволяє підвищити чутливість індуктивних сенсорів до 10 разів. Під час паралельного включення L-негатрона відбувається збільшення абсолютної та відносної чутливості, під час послідовного – лише відносної чутливості.

2) На параметри індуктивного сенсора впливають активні опори ПВП та L-негатрона. При паралельному включенні активний опір призводить до зменшення чутливості індуктивного сенсора та зменшення сумарної індуктивності кола та появи залежності сумарного активного опору кола від значення індуктивності ПВП.

3) Наявність від'ємного активного опору та від'ємної індуктивності L-негатрона призводить до потенційної нестійкості індуктивних схем сенсорів. Нестійкість дозволяє забезпечити режим автогенерації для побудови частотних індуктивних сенсорів. За алгебраїчним критерієм стійкості Рауса-Гурвіца визначені умови, за яких схема є нестійкою, в разі послідовного з'єднання  $L_x < -C_{\text{пвп}} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}$ , в разі паралельного –

$$R_g < -\frac{L_x R^{(-)}}{L_x + C_{\text{ПВП}} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}}, \quad L_x < \frac{-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{\text{ПВП}} - L^{(-)} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}}{R_g R^{(-)}}.$$

## Література

1. Філінюк М. А. Основи негатроніки: Том I Теоретичні і фізичні основи негатроніки / Микола Антонович Філінюк – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с. – ISBN 966-641-198-9.
2. Winncy Y. D. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies. CRC. Press. Talor and Francis Group, 2014. 408 p. ISBN 978-1439812440.
3. Патент України на корисну модель № 46280, МПК (2009.01) G01R 27/28. Індуктивний негасенсор з частотним виходом / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, О. В. Войцеховська, С. В. Мірошникова ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200907621 ; заявл. 20.07.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 1.
4. Патент України на корисну модель № 54019, МПК (2006.01) G01R 27/28. Індуктивний негасенсор мостового типу / О. В. Войцеховська, О. О. Лазарев, М. А. Філінюк, Д. В. Кудряшов ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201004679 ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
5. Філінюк М. А. Аналіз чутливості електричних кіл з L-, C-негатронами / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 2. – С. 92–98.
6. Філінюк М. А. Частотні датчики на L-, C- негатронах Філінюк М. А., О. О. Лазарев, Р. Ф. Лободзінська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. – № 1. – С. 84–89.
7. Філінюк М. А. LC-негатрони та їх застосування : монографія / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с. – ISBN 978-966-641-452-9

## References

1. Filinjuk M. A. Osнови negatroniki: Tom I Teoretichni i fizichni osnovi negatroniki / Mikola Antonovich Filinjuk – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2006. – 456s. – ISBN 966-641-198-9.
2. Winncy Y. D. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies / Y. D. Winncy – CRC. Press. Talor and Francis Group, – 2014. – 408 p. – ISBN 978-1439812440.
3. Patent Ukraini na korisnu model' №46280, MPK (2009.01) G01R 27/28. Induktivnij negasensor z chastotnim vihodom / M. A. Filinjuk, O. O. Lazarev, O. V. Vojcehovs'ka, S. V. Miroshnikova; zajavnik ta patentovlasnik Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet – №200907621; zajavl. 20.07.2009; opubl. 10.12.2009, Bjul. №1.
4. Patent Ukraini na korisnu model' №54019, MPK (2006.01) G01R 27/28. Induktivnij negasensor mostovogo tipu / O. V. Vojcehovs'ka, O. O. Lazarev, M. A. Filinjuk, D. V. Kudrjashov; zajavnik ta patentovlasnik Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet – №201004679; zajavl. 20.04.2010; opubl. 25.10.2010, Bjul. №20.
5. Filinjuk M. A. Analiz chutlivosti elektrichnih kil z L-, S-negatronami / M. A. Filinjuk, O. O. Lazarev // Visnik ZhITI. – 2003. – № 2. – S. 92-98.
6. Filinjuk M. A. Chastotni datchiki na L-, C- negatronah Filinjuk M. A., Lazarev O. O. Lobodzins'ka R. F. // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2004. – № 1. – S. 84–89.
7. Filinjuk M. A. LC-negatroni ta ih zastosuvannja: monografija / M.A. Filinjuk, O.O. Lazarev, O.V. Vojcehovs'ka – Vinnicja VNTU, 2012. – 308 s. ISBN 978-966-641-452-9

Рецензія/Peer review : 4.12.2014 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Білинський Й. Й.

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗАСОБІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Проведено аналіз принципів отримання максимальної правдоподібної оцінки затримки в пристроях синхронізації сигналів засобів телекомунікацій. Сформовано Simulink-модель пристрою синхронізації та методом імітаційного моделювання отримано бітові послідовності для аналізу його роботи. Здійснено аналіз та формалізацію опису пристроїв синхронізації таких, які керуються рішенням і таких, які не керуються рішенням. Розглянуто метод оцінювання часового зсуву без зворотного зв'язку за рішенням, шляхом використання симетричних властивостей сигналу на виході узгодженого фільтра або корелятора з вікнами на затримку-випередження. Наведено залежності для дисперсії максимальної правдоподібної оцінки пристрою синхронізації від відношення сигнал/шум. Отримано аналітичні вирази та залежності відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум на виході фазового детектору. Сформовано діаграми станів для оцінювання роботи цифрового пристрою синхронізації за наявності випадку, який характеризується станом помилки та діаграму помилки для аналізу часу до зриву синхронізації. Проведено визначення результатів розрахунку середнього часу до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум.

Ключові слова: цифрова синхронізація, керований генератор, дисперсія оцінювання, зрив синхронізації.

J.M. BOIKO, R.YU. NOCHKA  
Khmelnytsky National University

### QUALITY EVALUATION SYNCHRONIZATION DEVICES SIGNALS OF TELECOMMUNICATIONS

*Abstract - The analysis principles to maximize credible evaluation delay devices synchronization of telecommunications signals. Formed Simulink-device synchronization model by simulation and received bit sequence analysis of his work. The analysis and formalization description of synchronization devices are guided by such decisions and which are not governed by the decision. The method of evaluation of temporal change without feedback for decision by using symmetric properties of the signal at the output of the matched filter or correlator with windows on delay-ahead. Powered depending dispersion maximum credible evaluation device synchronization of the signal/noise ratio. Analytical expressions and dependence deviation error of synchronization signal/noise ratio at the output of the phase detector. Formed state diagram for the evaluation of digital device synchronization condition characterized by the presence of errors as errors and chart analysis of time to failure of synchronization. A determination of the results of the calculation of the average time to failure of synchronization of the signal/noise ratio.*

Keywords: digital synchronization, controlled oscillator, variance estimation, synchronization failure.

### Вступ

В загальному випадку синхронізацію можна охарактеризувати як процес встановлення і підтримки певних часових співвідношень між двома і більше процесами [1–3]. Тут слід акцентувати увагу на наступному: поелементна синхронізація – це синхронізація переданого і прийнятого цифрових сигналів даних, при якій встановлюються і підтримуються необхідні фазові співвідношення між значущими моментами переданих та прийнятих відповідно одиничних елементів сигналів. В цифрових засобах телекомунікацій вихід демодулятора повинен періодично стробуватись зі швидкістю передачі символів в точно обраних моментах  $t_n = \delta T + \mathcal{Q}$ , де  $T$  – символний інтервал, а  $\mathcal{Q}$  – номінальний час затримки, який визначається часом поширення сигналу від передавача до приймача. Щоб виконувати це періодичне стробування потрібний таймерний сигнал в приймачі. Причому, приймач повинен знати не тільки частоту  $1/T$ , з якою стробуються виходи узгоджених фільтрів або коректорів [4–7], але також той момент часу, в який необхідно взяти відліки всередині кожного символного інтервалу. Положення відлікового моменту всередині символного інтервалу тривалістю  $T$  назвемо фазою синхронізації. Слід відокремити наступні підходи до реалізації пристрою тактової синхронізації: в першому випадку в системі зв'язку таймери передавача і приймача синхронізовані за зразковим таймером, який забезпечує високостабільну сітку часу. В цьому випадку приймач повинен оцінити і компенсувати тільки відносний час затримки між переданим і прийнятими сигналом, в другому випадку можна використати метод для досягнення синхронізації символів який реалізується одночасною передачею передавачем таймерної частоти, яка рівна або кратна  $1/T$ , разом з інформаційним сигналом. Тоді на приймальному боці використовується вузькосмуговий фільтр, налаштований на передану таймерну частоту, і таким чином формується таймерний сигнал для стробування. В цьому випадку слід мати на увазі декілька моментів: перший полягає в тому, що передавач повинен віддати деяку частину можливої потужності для передачі таймерного сигналу; другий – полягає в тому, що деяка мала частина доступної в каналі смуги частот повинна бути зайнята для передачі таймерного сигналу. Таймерний сигнал можна також отримати з прийнятого інформаційного сигналу. Такий підхід є досить актуальним у випадку коли для зменшення впливу статистичної структури переданого кодового повідомлення на точність і час підтримки синхронізму використовують скремблювання. При цьому на передану послідовність можна накласти (заздалегідь відому) псевдовипадкову послідовність, а на прийомі провести віднімання даної послідовності з прийнятого сигналу. В будь-якому випадку до систем тактової синхронізації можна пред'явити низку вимог, а саме: висока точність синхронізації, коли допустиме

відносне відхилення синхроімпульсів (тактових імпульсів) від моментів які відповідають ідеальній синхронізації не перевищує 3%; малий час входження в стан синхронізації як при первинному включенні, так і після перерви зв'язку; збереження синхронізації при наявності завад і короткочасних перерв зв'язку; незалежність точності синхронізації від статичної структури переданого повідомлення. Слід також зазначити, що подібна задача забезпечення перелічених вище вимог багатогранна, саме тому у статті зосередимо увагу на визначенні середнього квадрату помилки синхронізації в стаціонарному стані на виході фазового детектору та визначенні середнього часу до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум для цифрового пристрою синхронізації. З метою практичного дослідження пристроїв синхронізації телекомунікаційних систем в роботі використано методи математичного та імітаційного моделювання, з використанням засобів Simulink середовища Matlab, середовища Wolfram Mathematica, Mathcad.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій та розробка питання оптимізації пристроїв поелементної синхронізації засобів телекомунікацій

При синхронному методі передачі, передавач безперервно формує елементи сигналу тривалістю  $T_0$ , яка дорівнює одиничному інтервалу (рис. 1, а) [8, 9]. Елементи об'єднуються в комбінації тривалістю  $T_K$ . Знаючи момент початку включення передавача можна визначити час приходу будь-якого одиничного елемента, а знаючи число одиничних елементів кодової комбінації, легко відокремити одну кодову комбінацію від іншої. На рис. 1, б), в) показані відповідно імпульси, що відокремлюють один елемент від іншого і одну групу елементів від іншої, в момент  $t_0$  тактова послідовність збігається з ідеальною. Визначивши інтервали часу, на яких з'являються елементи, можна передбачити час приходу найбільш стійкої частини елементів сигналу. Реєструючи сигнал в цій частині, можна знизити ймовірність неправильного прийому елемента. На рис. 2 представлена Simulink-модель пристрою синхронізації, а на рис. 3 бітові послідовності отримані методом імітаційного моделювання. В схемі на рис.2 кола «forming circuit» призначено для формування квадратурних складових сигналу, який передається по каналу «information channel», в якому програмно змінюється відношення  $E/N_0$  – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму AWGN – каналу [10, 11] та потрапляє на пристрій синхронізації який, зокрема, містить підсистеми цифрових керованих генераторів (ГКН) Discrete-Time VCO, відповідні фільтруючі пристрої Digital Filter Design [12]. Основна задача системи синхронізації, мінімізувати вплив шумової складової на бітову послідовність. На рис. 3, епюри бітових послідовностей на передавальному боці, після каналу передачі інформації ( $E/N_0=10\text{дБ}$ ) та у випадку спрацювання пристрою синхронізації. Спостерігаємо задовільну якість відновлення синхронізму. Використаємо описану модель для проведення оцінювання якісних показників пристрою синхронізації засобів телекомунікацій.

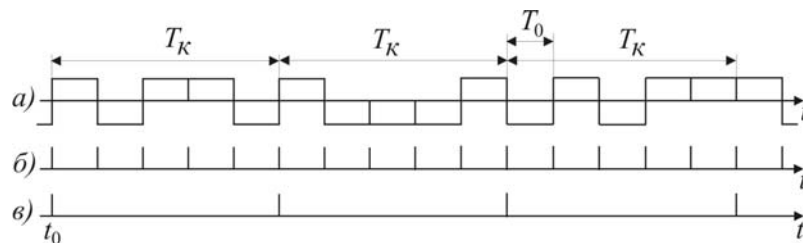


Рис. 1. Формування елементів кодових комбінацій при синхронному методі передачі

Розглянемо принципи забезпечення тактової синхронізації в приймальному пристрої на основі використання методу оцінювання який оснований на керованому рішенні та метод оцінювання на некерованому рішенні [1, 2, 8].

Розглянемо принципи отримання максимальної правдоподібної оцінки затримки  $\mathcal{G}$  [1, 8].

Сигнал на приймальному боці, після каналу передачі інформації, який містить шумову компоненту (рис. 3 «Прийнята бітова послідовність») представимо наступним чином:

$$r(t) = U(t; \mathcal{G}) + n(t), \quad (1)$$

$$U(t; \mathcal{G}) = \sum_n I_n h(t - nT - \mathcal{G}). \quad (2)$$

Зосередимо в дослідженні увагу на аналізі пристроїв синхронізації таких які керуються рішенням і таких які не керуються рішенням [1, 2, 8].

В пристрої першого типу, символи при передачі інформації у вигляді послідовності даних  $\{I_n\}$  на виході демодулятора, будемо вважати відомою переданою послідовністю. Тоді для функції правдоподібності отримаємо наступний вираз [1, 2, 12]:

$$\Phi_{\text{in}}(\mathcal{G}) = C_{\text{in}} \int_{T_0} r(t) U(t; \mathcal{G}) dt. \quad (3)$$

або з (3) та (2) отримаємо наступний вираз:

$$\Phi_{ln}(\vartheta) = C_{ln} \cdot \sum_n I_n \int_{T_0} r(t)h(t-nT-\vartheta)dt = C_{ln} \sum_n I_n U_n(\vartheta). \quad (4)$$

$$U_n(\vartheta) = \int_{T_0} r(t)h(t-nT-\vartheta)dt. \quad (5)$$

тут  $C$  – константа яка не залежить від  $\vartheta$ .

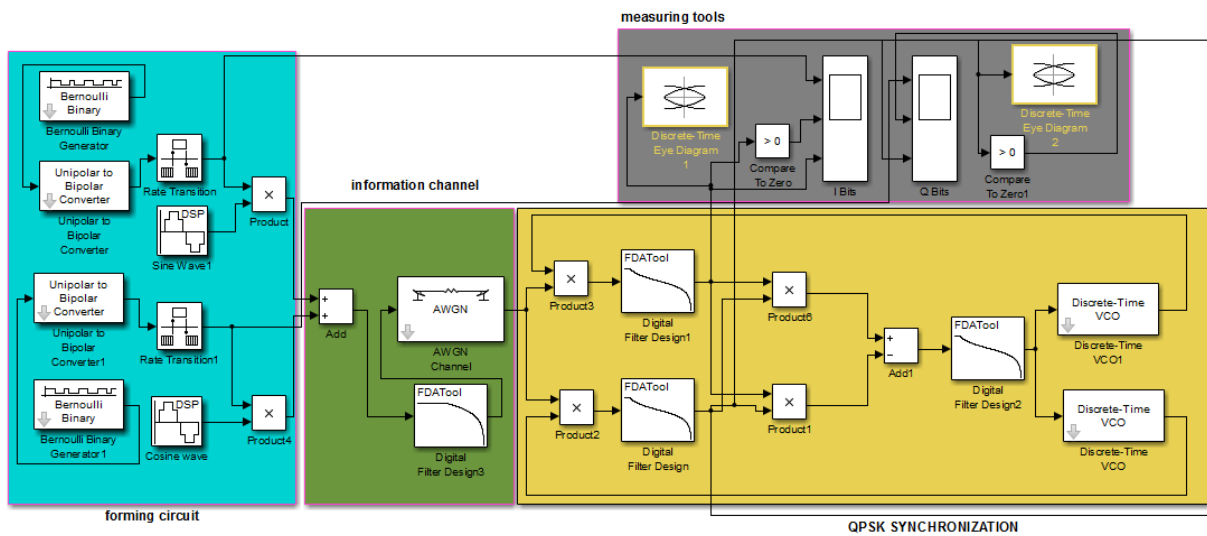


Рис. 2. Simulink-модель пристрою синхронізації для QPSK

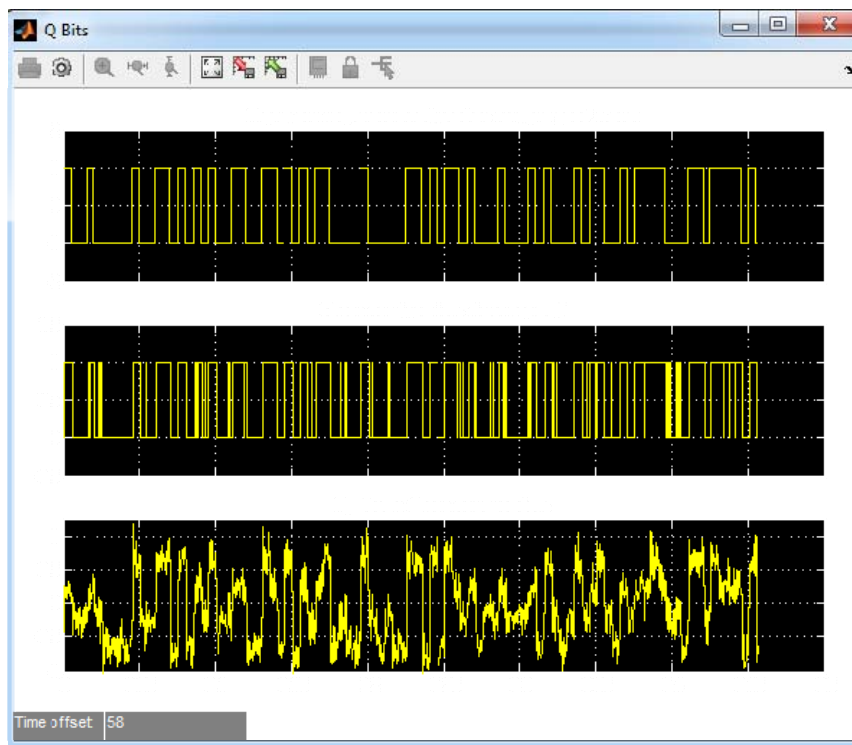


Рис. 3. Бітові послідовності для аналізу роботи пристрою синхронізації з QPSK

Максимальна правдоподібна оцінка  $\vartheta$  буде мати вигляд (тут ми використали підхід аналогічний розглянутому у роботі [2]):

$$\frac{d\Phi_{ln}(\vartheta)}{d\vartheta} = \sum_n I_n \frac{d}{d\vartheta} \int_{T_0} r(t)h(t-nT-\vartheta)dt = \sum_n I_n \frac{d}{d\vartheta} (U_n(\vartheta)) = 0. \quad (6)$$

З формули (6) встановлюємо принцип реалізації пристрою синхронізації шляхом формування кола відслідковування, яке представимо рис. 4 (тут і далі розглядаємо для спрощення один з квадратурних каналів реалізації пристрою синхронізації):

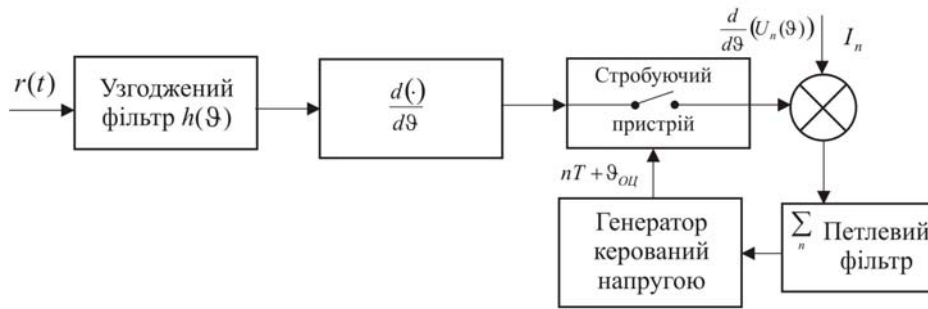


Рис. 4. Блок-схема принципу отримання максимальної правдоподібної оцінки параметра затримки за методом керування рішенням

Петлеве підсумовування в схемі проводиться петлевым фільтром [10], смуга якого керується довжиною ковзного вікна при додаванні. Вихід петлевого фільтра подається на генератор керований напругою який керує інтервалом стробування на виході петлі. В цьому випадку продетектована інформаційна послідовність  $I_n$  використовується для оцінювання  $\theta$  і таким чином таке оцінювання буде кероване рішенням.

У випадку реалізації методу синхронізації шляхом оцінювання параметру затримки некерованого рішенням, використаємо процес усереднення відношення правдоподібності  $\Phi_{ln}(\theta)$  із врахуванням функції густини ймовірності інформаційних символів для отримання  $\bar{\Phi}_{ln}(\theta)$ . Далі  $\bar{\Phi}_{ln}(\theta)$  диференціюємо за  $\theta$  для отримання максимальної правдоподібної оцінки  $\hat{\theta}_{ou}$ .

Використаємо модель сигналу у вигляді (2), де  $I_n = \pm 1$  рівноймовірні, тоді усереднення за даними дозволяє отримати наступний вираз:

$$\bar{\Phi}_{ln}(\theta) = \sum_n \ln \text{ch} CU_n(\theta). \tag{7}$$

Так як  $\ln \text{ch} x \approx 1/2x^2$  для малих  $x$ , використаємо квадратичну апроксимацію (низькі відношення сигнал/шум) та отримаємо:

$$\bar{\Phi}_{ln}(\theta) = \frac{1}{2} C^2 \sum_n U_n^2(\theta). \tag{8}$$

Оцінку для  $\theta$  отримаємо шляхом диференціювання (8), в цьому випадку результат буде апроксимацією для максимальної правдоподібної оцінки часу затримки за відсутності керування рішеннями. Отримаємо наступне:

$$\frac{d}{d\theta} \sum_n U_n^2(\theta) = 2 \sum_n U_n(\theta) \frac{dU_n(\theta)}{d\theta} = 0, \tag{9}$$

тут  $U_n(\theta)$  визначено з (5). Реалізація петлі відслідковування робота якої ґрунтується на обчисленні похідної  $\bar{\Phi}_{ln}(\theta)$  у відповідності до (9) може бути представлена рисунком 5.

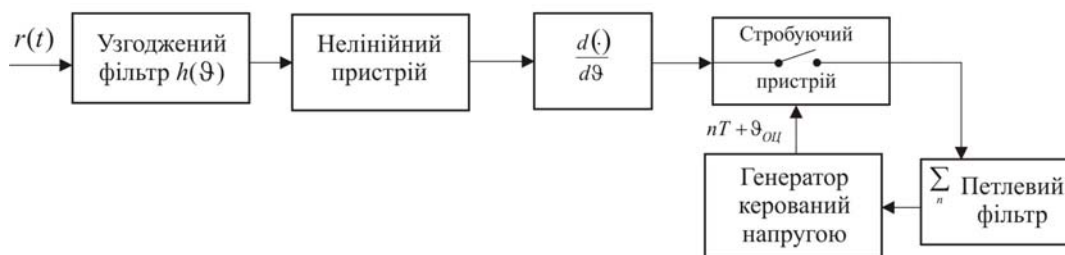


Рис. 5. Блок-схема принципу отримання максимальної правдоподібної оцінки параметра затримки за методом без керування рішенням

В схемі нелінійний пристрій реалізує математичні операції  $(\cdot)^2$ ,  $|\cdot|$ ,  $\ln \text{ch}(\cdot)$ , а в Simulink-моделі на рис.2 та в [1, 2, 8] такі операції реалізовано на підсистемах. На рис.6 альтернативна схема реалізації петлі відслідковування. Тут так само як в схемі на рис.5, в якості суматора використано петлевий фільтр який керує ГКН.

Оцінювання часового зсуву без зворотного зв'язку за рішенням, можна реалізувати шляхом використання симетричних властивостей сигналу на виході узгодженого фільтра або корелятора. Метод реалізуємо таким чином: розглянемо прямокутний імпульс  $U(t)$  на інтервалі, показаний на рис. 7 (а). Вихід

фільтра, узгодженого з  $U(t)$  отримує своє максимальне значення в точці  $t = T$ , як показано на рис. 7 (б). Таким чином, вихід узгодженого фільтра є часовою функцією кореляції імпульсу  $U(t)$ . Важлива точка для взяття відліку на виході узгодженого фільтра для отримання максимального виходу – це  $t = T$ , тобто точка на піку кореляційної функції.

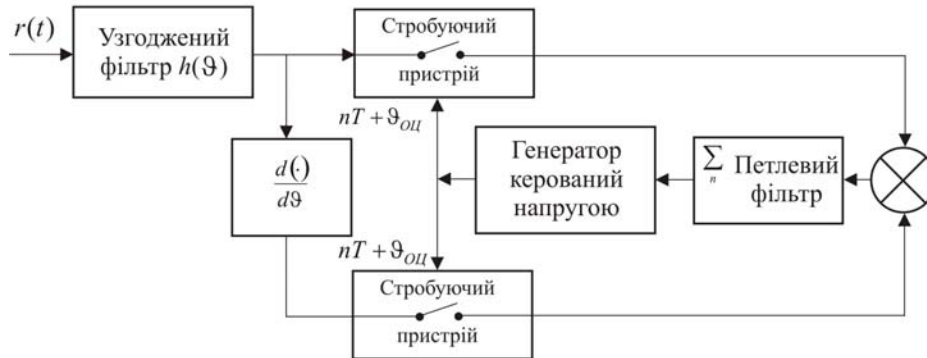


Рис. 6. Блок-схема оцінювання часового зсуву без зворотного зв'язку за рішенням

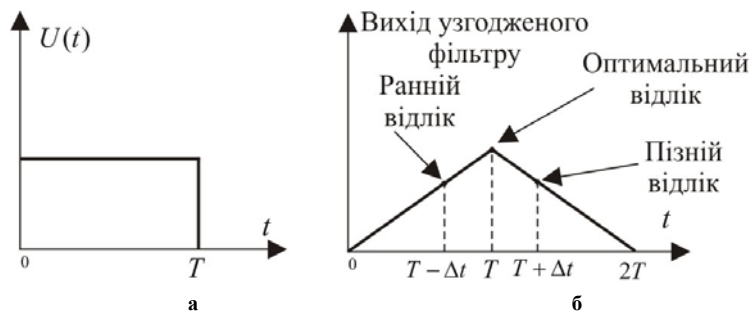


Рис. 7. Прямокутний імпульс сигналу а) і вихід узгодженого з ним фільтра б)

В присутності шуму ідентифікація пікового значення сигналу в загальному випадку ускладнена. Припустимо, що замість стробування сигналу в точці піку беремо відлік раніше (в точці  $T - \Delta t$ ) і пізніше (в точці  $T + \Delta t$ ). Абсолютні значення ранніх відліків  $|U(n(T - \Delta t))|$  і пізніх відліків  $|U(n(T + \Delta t))|$  будуть менше (в середньому в присутності шуму), ніж абсолютне значення на піку  $|U(nT)|$ . Оскільки автокореляційна функція парна щодо оптимального часу взяття відліків  $t = T$ , абсолютні значення кореляційної функції в точці  $t = T - \Delta$  і  $t = T + \Delta$  рівні. З урахуванням цієї умови оптимальна точка відліку середня точка між  $t = T - \Delta$  і  $t = T + \Delta$ . Таким чином реалізуємо пристрій синхронізації з вікнами на затримку-випередження.

На рис. 8 структурна схема синхронізатора з вікнами на затримку та випередження. Корелятори в схемі використано замість узгоджених еквівалентних фільтрів. Два корелятора інтегрують по символічному інтервалу  $T$ , але один корелятор починає інтегрування на  $\Delta$  секунд раніше відносно оцінюваного оптимального часу відліку, а другий інтегратор починає інтегрування на  $\Delta$  секунд пізніше відносно оцінюваного оптимального часу відліку. Сигнал помилки формується шляхом взяття різниці між абсолютними значеннями виходів двох кореляторів. Щоб згладити вплив шуму на відліки сигналів, сигнал помилки пропускається через фільтр нижніх частот. Якщо час відліку відрізняється від оптимального часу відліку, усереднений сигнал помилки на виході фільтра нижніх частот не нульовий, і таймерна послідовність зміщується в бік відставання або випередження, залежно від знака помилки. Таким чином, згладжений сигнал помилки використовується для управління ГКН, вихід якого є бажаним відліковим сигналом, який використовується для стробування. Вихід ГКН також використовується як таймерний сигнал для генератора символічного сигналу, який видає ту ж базову форму імпульсу, що на виході фільтра передавача. Ця форма імпульсу зміщується в часі на в сторону випередження і відставання, і отримані зразки очікуваного сигналу надходять на два корелятора, як показано на рис. 8. Зауважимо, що, якщо сигнальні імпульси прямокутні, немає потреби в генераторі сигнального імпульсу всередині петлі відслідковування.

Система синхронізації з вікнами на затримку-випередження будується на основі системи замкнутого петлевого управління, смуга такої петлі вузька в порівнянні зі швидкістю передачі символів  $1/T$ . Смуга петлі визначає якість оцінки часу затримки. Вузькосмугова петля забезпечує більше усереднення за адитивним шумом, а отже покращує якість оцінюваних відлікових величин за умови, що час поширення в каналі незмінний і генератор керований напругою (таймерний) на передачі не дрейфує з часом (або дрейфує дуже повільно в часі). З іншого боку, якщо час поширення в каналі змінюється з часом або таймер передавача також дрейфує з часом, тоді смугу петлі слід збільшити, щоб забезпечити відстеження швидких змін у часі параметрів синхронізації. В пристроях стеження два корелятори ефективно взаємодіють при сусідніх символах. У випадку QPSK-модуляції, вклад на виходах кореляторів від сусідніх імпульсів усереднюється до нуля в фільтрах нижніх частот.



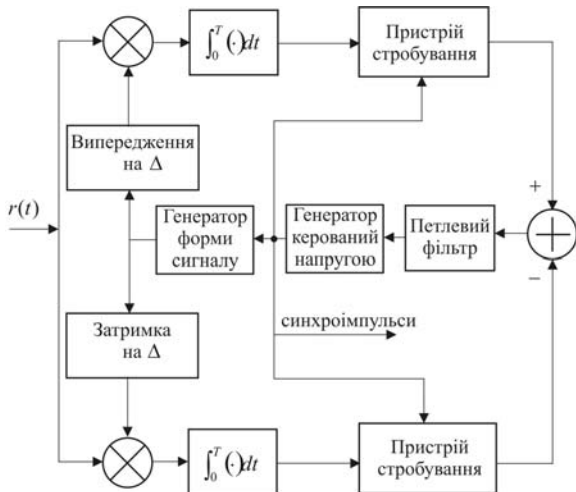


Рис. 8. Блок схема синхронізатора з вікнами на випередження та затримку

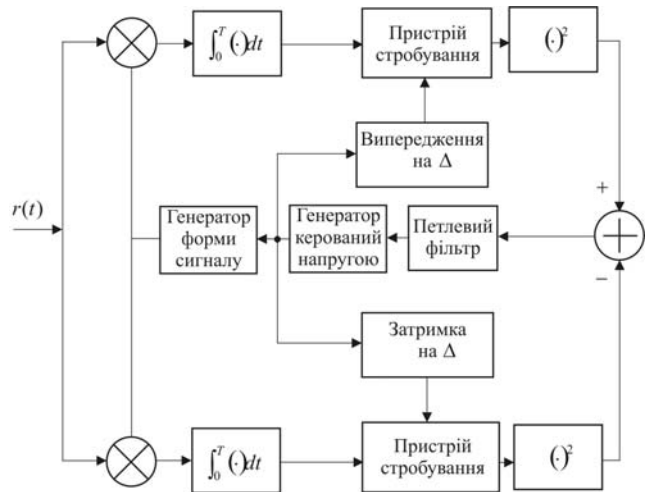


Рис. 9. Блок схема синхронізатора з вікнами на випередження та затримку із піднесенням до квадрату

Альтернативний варіант можливої реалізації пристрою синхронізації представлено на рис. 9. В цьому випадку таймерний сигнал від ГКН випереджає і запізнюється на  $\Delta$ , і ці таймерні сигнали використовуються для стробування виходів двох кореляторів. Система синхронізації з вікнами на затримку-випередження, описаний вище, є пристроєм оцінювання затримки сигналу, що не керується рішеннями і який апроксимує максимально правдоподібний пристрій оцінювання. Такий результат можна отримати шляхом апроксимації похідної від логарифма функції правдоподібності кінцевої різницею, у вигляді:

$$\frac{d\bar{\Phi}_{\ln}(\vartheta)}{d\vartheta} = \frac{\bar{\Phi}_{\ln}(\vartheta - \Delta) - \bar{\Phi}_{\ln}(\vartheta + \Delta)}{2\Delta}, \tag{10}$$

підставляємо у вираз (10) вираз (8), та отримаємо:

$$\frac{d\bar{\Phi}_{\ln}(\vartheta)d\vartheta}{d\vartheta} = \frac{C^2}{4\Delta} \sum_n (U_n^2(\vartheta + \Delta) - U_n^2(\vartheta - \Delta)) \approx \frac{C^2}{4\Delta} \sum_n \left[ \left( \int_{T_0} r(t)h(t - nT - \vartheta - \Delta)dt \right)^2 - \left( \int_{T_0} r(t)h(t - nT - \vartheta + \Delta)dt \right)^2 \right]. \tag{11}$$

Аналіз формалізованого подання функціонування пристроїв тактової синхронізації дозволяє встановити, що математичний вираз 11 описує процес роботи системи синхронізації з вікнами на затримку та випередження. На рис.10 приведено залежності для дисперсії максимальної правдоподібної оцінки спрацювання пристрою синхронізації залежно від відношення сигнал/шум  $-h$ , отримані методом математичного моделювання.

Результати порівняння дозволяють встановити, що дисперсія максимальної правдоподібної оцінки спрацювання пристрою синхронізації з петлею яка працює за рішенням в 2,6 рази менша для відношення сигнал/шум яке дорівнює 10 дБ [1, 2].

**Оцінювання якості цифрових пристроїв синхронізації**

Оцінювання якості роботи цифрового пристрою синхронізації проведемо шляхом визначення середнього квадрату помилки синхронізації в стаціонарному стані. Слід зазначити, що ймовірнісні стани відхилень пристрою протягом часу будуть прямувати до нуля, а середній квадрат помилки синхронізації необмежено зростає. В цьому випадку приймаємо,

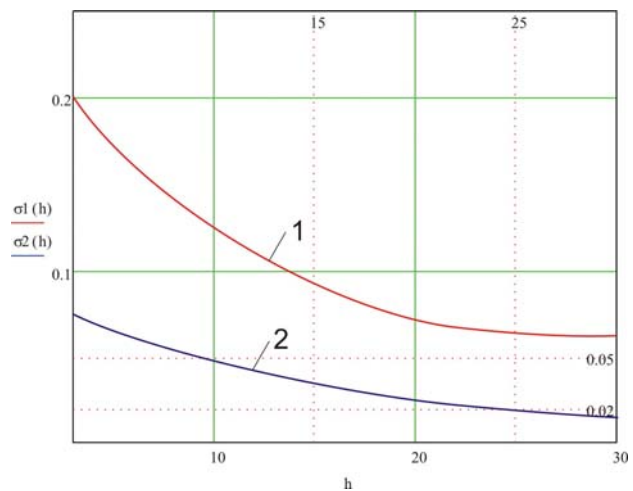


Рис. 10. Залежність нормованої середньоквадратичної помилки оцінювання  $\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_{\vartheta}}{T}$  від відношення сигнал до шуму  $h$ : 1 – оцінка яка не керується рішенням; 2 – оцінка яка керується рішенням

що із плином часу можливі значні помилки синхронізації. Враховуючи зазначене, розглянемо значення помилок синхронізації які приведемо до інтервалу який дорівнює періоду корисного сигналу  $T$ . Тоді перехід з стану  $n$  в  $n+1$  призведе до потрапляння системи в стан  $-n$  в  $-n-1$  до  $n$ . Представимо цей процес у вигляді діаграми станів рисунком 11. Прийнемо наступні припущення щодо роботи цифрового пристрою синхронізації: помилка синхронізації змінюється через  $T$  на задану частину  $\xi$  періоду сигналу  $T_c$ ; відліки білого шуму, які пройшли через ідеальний фільтр із смугою пропускання  $\Delta F$  і квантованого за часом із швидкістю  $2\Delta F$ , дають статистично незалежні вибірки. Нехай зміни помилки синхронізації визначаються шляхом додавання  $k$  значень цих статистичних незалежних вибірок, тоді ймовірність зміни помилки на величину  $\pm\xi$  для сигналу прямокутної форми не залежать від положення вибірок на вісі часу.

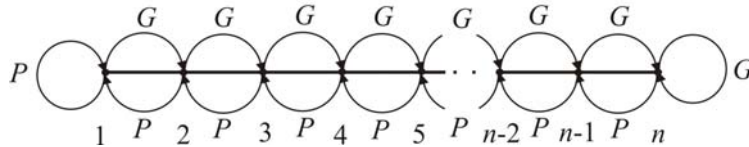


Рис. 11. Діаграма станів для оцінювання середнього квадрату помилки синхронізації

Якщо визначити стан помилки у вигляді повної помилки синхронізації безпосередньо перед корекцією, то можна встановити, що статистична динаміка цифрового пристрою синхронізації на основі кола фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАП) описується марківською моделлю із певним числом станів, аналіз якої проведений у роботах [1, 2, 8]. На рис. 12 можливі стани помилки протягом періоду сигналу прямокутної форми. Помилка синхронізації змінюється по відношенню до моменту від'ємного переходу корисного сигналу. Усі стани кола розділимо рівними відрізками  $\xi$  одного періоду сигналу. В цьому випадку будуть існувати  $2n = 1/\xi$  можливих станів в одному періоді. За відсутності шуму в колі зворотного зв'язку буде вироблятися вірний сигнал керування і система буде здійснювати послідовні переходи з стану  $+1$  до стану  $-1$  і в зворотному напрямку, тоді помилка синхронізації становить  $\pm\xi/2$ . Для проведення аналізу прийнемо наступне припущення: вибірки  $\varepsilon_i$  нормального білого шуму взяті із швидкістю  $2\Delta F$ , є нормально розподіленими і мають такі статистичні характеристики:  $\langle \varepsilon_i \rangle = 0$ ,  $\sigma_i^2 = \langle \varepsilon_i^2 \rangle = N_0 \Delta F$ ,  $\langle \varepsilon_i \varepsilon_j \rangle = 0$

Проведемо дослідження та обчислимо ймовірність того, що за результатами накопичення  $k$  вибірок на детекторі (див. схему на рис. 2) буде формуватись вірний сигнал керування і за результатами коригування величина помилки синхронізації зменшиться на  $\xi$ .

Нехай пристрій знаходиться в одному з додатних станів помилки, яку на діаграмі представимо рис. 13. В цьому випадку шукана ймовірність може бути визначена наступним чином:

$$P = p\left(\sum_{i=1}^k (-U_0 + \varepsilon_i) < 0\right). \tag{12}$$

тут сума у дужках представляє собою суму незалежних випадкових величин розподілених за нормальним законом і має наступні характеристики:  $M = -kU_0$ ;  $\sigma^2 = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 = kN_0 \Delta F$  (математичне очікування та дисперсія відповідно).

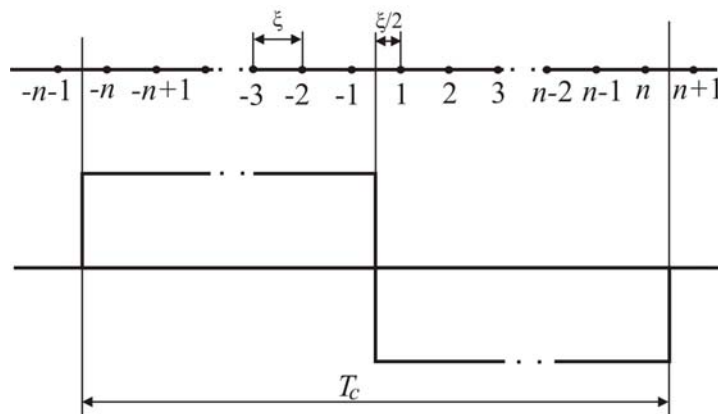


Рис. 12. Пояснення виникнення помилки синхронізації на тривалості періоду  $T_c$  сигналу прямокутної форми

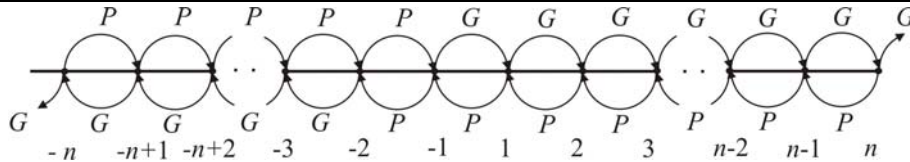


Рис. 13. Діаграма станів за наявності стану який характеризується додатнім станом помилки

Ймовірність наявності невірного сигналу керування розрахуємо з формули:

$$G = 1 - P, \quad (13)$$

тут процес на вході пристрою синхронізації блоку оброблення сигналів представимо у вигляді адитивної суміші корисного сигналу  $r(t)$  та шуму  $\varepsilon(t)$ . Тоді прийняте коливання буде мати вигляд:  $S(t) = r(t) + \varepsilon(t)$ . Нехай  $r(t)$  – сигнал у вигляді прямокутних імпульсів із амплітудою  $U_0$  і періодом  $T_c$ , а  $\varepsilon(t)$  – нормальний білий шум.

З рис. 13 встановлюємо, що для від'ємного напівперіоду корисного сигналу вірний сигнал керування буде утворювати процес віднімання з загальної помилки синхронізації величини  $\xi$ , а отже перехід пристрою з стану  $i+1$  до стану  $i$ . В цьому випадку, для додатного на півперіоду корисного сигналу утворюється наступна картина: вірний сигнал керування приводить до додавання величини  $\xi$  та утворення переходу з стану  $i$  до стану  $i+1$ . Таким чином будемо описувати динамічні процеси зміни стану цифрового пристрою синхронізації.

Обчислення середнього квадрату помилки має значення у випадку обчислення абсолютного значення цієї величини. В цьому випадку потрапляння в стан  $-n$  (або  $n$ ) з стану  $n$  (або  $-n$ ) будемо розглядати як продовження з ймовірністю  $G$  передування в стані  $n$  (або  $-n$ ). Далі, стани  $i$  та  $-i$  де  $i = \overline{1, n}$  дадуть однаковий вклад до величини середнього квадрату помилки. Проведений аналіз дозволяє використати модель представлену на рис. 11 з наступним припущенням: стани  $1$  і  $n$  є пружними жорсткими, а стрілками покажемо можливі зміни стану із відповідними ймовірностями переходу.

Позначимо як  $Z_{il}(k)$  ймовірність того, що система в момент  $t = kT$  буде переходити в стан  $l$  якщо початковий стан системи  $i$ . Стаціонарні значення ймовірностей станів визначимо так:

$$p_l = \lim_{k \rightarrow \infty} Z_{il}(k). \quad (14)$$

Стаціонарне значення ймовірності станів  $p_l$  буде задовольняти рівнянню:

$$p_l = Gp_{l-1} + Pp_{l+1}, \quad l = 2, \quad \overline{N-1}, \quad (15)$$

граничні умови представимо так:

$$p_1 = Pp_2 + Pp_1, \quad p_N = Gp_{N-1} + Gp_N, \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (15) запишемо у вигляді:

$$p_l = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{1 - G/P}{1 - (G/P)^N} (G/P)^{|l-1|} \quad l = -N, \dots, -1, 1, \dots, N. \quad (17)$$

Ми використали умову симетрії  $p_l = p_{-l}$ , а також умову нормування  $\sum_{l=1}^N p_l = 1/2$ .

З формули (17) встановлюємо, що у випадку відсутності корисного сигналу, тобто  $P = G$ , рівновісний розподіл ймовірності стану помилок в цифровому пристрої синхронізації буде мати вигляд:  $p_l = 1/2N$ ,  $l = -N, -1, 1, \dots, N$ . За відсутності корисного сигналу, помилки синхронізації розподілені за рівномірним законом.

Середній квадрат помилки синхронізації в стаціонарному стані визначимо з формули:

$$\sigma^2 = 2 \sum_{l=1}^N \left(l - \frac{1}{2}\right)^2 \xi^2 p_l. \quad (18)$$

Враховуємо вираз (17) з (18) отримаємо наступний вираз:

$$\sigma^2 = \frac{\xi^2}{G/P} \frac{1 - G/P}{1 - (G/P)^N} \sum_{l=1}^N \left(l - \frac{1}{2}\right)^2 (G/P)^l. \quad (19)$$

Наявність корисного сигналу будемо фіксувати наступними умовами:  $U_0 \neq 0$ ,  $P > G$ . Позначимо суму ряду  $\sum_{l=1}^N (G/P)^l = R(G/P)$  з врахуванням (19) отримаємо:

$$\sigma^2 = \frac{\xi^2}{G/P} \frac{1-G/P}{1-(G/P)^N} \left( (G/P)^2 \frac{d^2R}{dG/P^2} + \frac{1}{4}R \right) = \frac{\xi^2}{4} + \frac{\xi^2}{1-G/P^N} (-N(N+1)G/P^N + 2G/P \frac{1-(N+1)G/P^N}{1-G/P} + 2G/P^2 \frac{1-G/P^N}{1-G/P^2}) \quad (20)$$

Відношення сигнал/шум на виході фазового детектору представимо наступним виразом:

$$h = \frac{E}{N_0} \frac{k}{\Delta FT_c}, \quad (21)$$

тут  $E = U_0^2 T_c$  – енергія корисного сигналу у вигляді прямокутних імпульсів,  $k$  кількість вибірок на детекторі синхронізатору,  $E / N_0$  – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму [11, 12].

Враховуємо 21 та 20 та шляхом математичного моделювання отримаємо залежності стандартного відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум на виході фазового детектору пристрою синхронізації які представимо рис. 14.

Асимптотичне значення  $\sigma$  у випадку  $h \rightarrow \infty$  буде дорівнювати  $\sigma = \xi / 2$ . Робимо висновок: зменшення інтервалу коригування, тобто величини  $\xi$ , призведе до підвищення точності синхронізації. Крім того, як слідує з формули 21, збільшення смуги пропускання фільтруючого пристрою для зменшення спотворень сигналу, у випадку фіксованого відношення  $E / N_0$ , приведе до зниження точності синхронізації.

Оцінювання якості роботи цифрового пристрою синхронізації можна провести шляхом дослідження часу до зриву синхронізації. Очевидно, для зриву синхронізації буде характерний перший вихід величини помилки синхронізації за визначені границі. Проведемо визначення часу до зриву синхронізації у випадку наступного припущення: в пристрої синхронізації відбувається зрив синхронізації якщо помилка потрапляє в стан  $N + 1$  або  $-(N + 1)$  як це показано на рис. 13.

Проведемо дослідження часу до зриву синхронізації  $T_{zp}$  за умови якщо пристрій синхронізації в початковий момент знаходиться у стані  $+1$  або  $-1$ . У відповідності до рис. 11 формуємо діаграму помилки для аналізу часу до зриву синхронізації яку представимо на рис. 13.

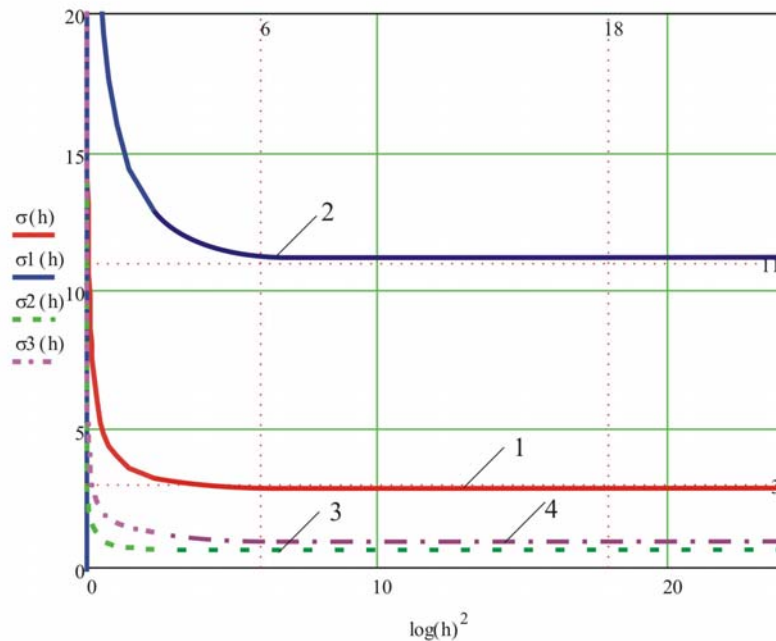


Рис. 14. Залежність відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум на виході фазового детектору: 1 –  $\sigma(h)$  при  $\xi = 1/32$ ; 2 –  $\sigma1(h)$  при  $\xi = 1/16$ ; 3 –  $\sigma2(h)$  при  $\xi = 1/256$ ; 4 –  $\sigma3(h)$  при  $\xi = 1/128$ , ( $\sigma$  розраховано в градусах)

На рис. 15 стан 1 будемо рахувати стійким, а стан  $N + 1$  – нестійким. Проведемо позначення наступним чином –  $t_i$  середній час досягнення нестійкого стану  $i + 1$  з первинного стану  $i$ , нормований до величини  $t = kT_c$ .

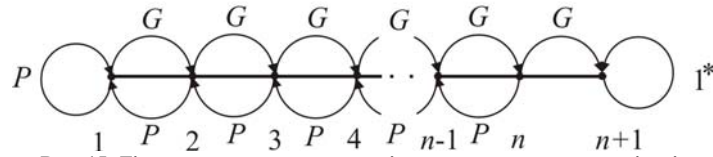


Рис. 15. Діаграма помилки для аналізу часу до зриву синхронізації

Якщо на першому кроці система з стану  $i$  з ймовірністю  $G$  перейде в сусідній стан  $i+1$ , тоді подальший процес випадкових змін буде продовжуватися таким чином, що початковим станом системи буде рахуватись стан  $i+1$ . Такі міркування дозволяють встановити середній час до зриву синхронізації за умови, що на першому кроці система перейде в стан  $i+1$  і буде дорівнювати  $t_{i+1} + 1$ . Далі, якщо система перейде на першому кроці в стан  $i-1$ , тоді середній час до зриву синхронізації прийме значення  $t_{i-1} + 1$ . Тобто для середнього часу  $t_i$  до зриву синхронізації можна записати рівняння:

$$t_i = G(t_{i+1} + 1) + P(t_{i-1} + 1) = Gt_{i+1} + Pt_{i-1} + 1, \quad i = \overline{2, N}. \tag{22}$$

Граничні умови:  $t_{N+1} = 0, t_1 = Gt_2 + Pt_1 + 1$ .

Розв'язок рівняння будемо шукати у вигляді:

$$t_i = \frac{i}{P-G} + X + Y \left(\frac{P}{G}\right)^i \quad P > G \tag{23}$$

де  $X, Y$  – довільні сталі.

Підстановка (23) у (22) отримаємо:

$$t_i = \frac{i - N - 1}{P - G} + \frac{P}{(P - G)^2} \left( \left(\frac{P}{G}\right)^N - \left(\frac{P}{G}\right)^{i-1} \right). \tag{24}$$

Тоді нормований час до зриву синхронізації з стану  $i=1$  визначимо так:

$$t_1 = \frac{t_1^*}{kT_c} = -\frac{N}{P - G} + \frac{P}{(P - G)^2} \left( \left(\frac{P}{G}\right)^N - 1 \right). \tag{25}$$

Умова використання формули:  $P > G$ .

На рис.16 та рис.17 результати розрахунку середнього часу до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум.

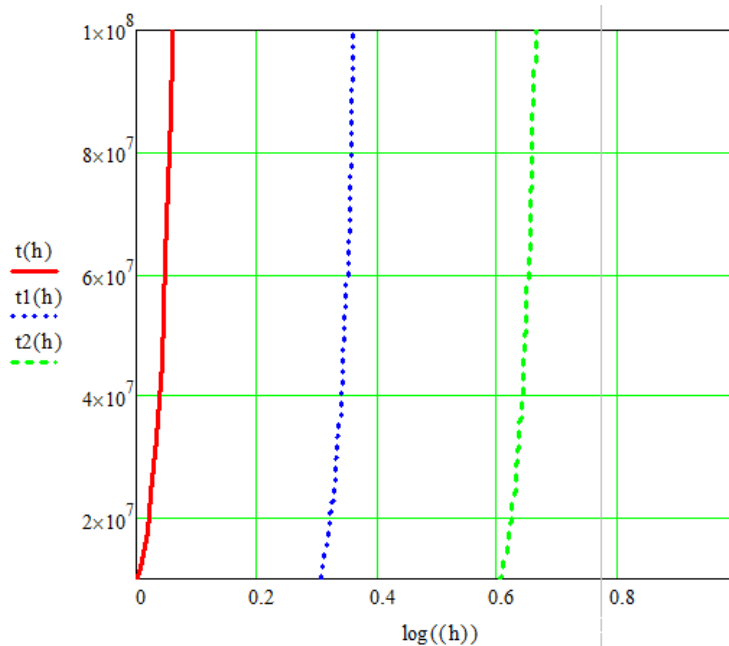


Рис. 16. Середній час до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум:  $t(h)$  за  $\xi = 1/64$ ;  $t_1(h)$  за  $\xi = 1/32$ ;  $t_2(h)$  за  $\xi = 1/16$

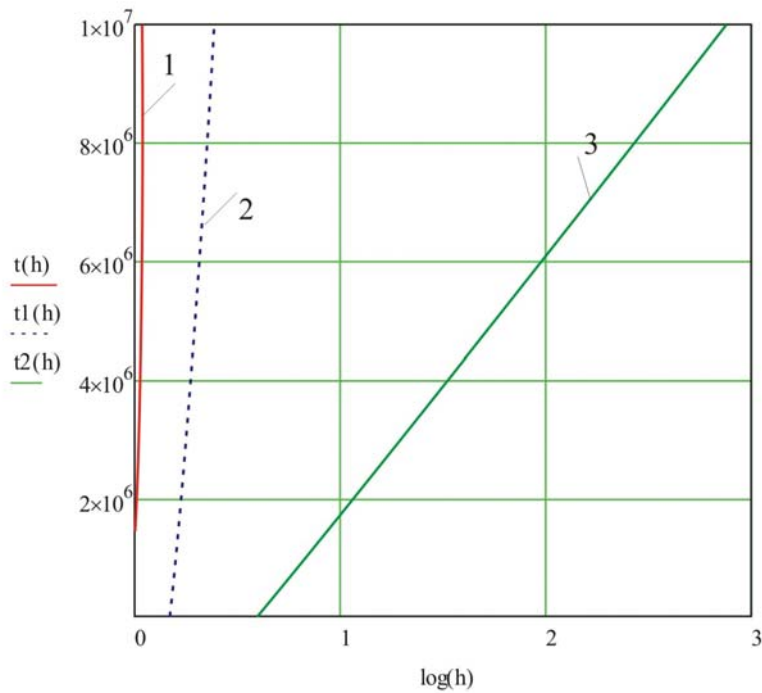


Рис. 17. Середній час до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум нормований до величини  $t = kT_c : 1 - t(h)$  за  $\xi = 1/64$ ; 2 –  $t_1(h)$  за  $\xi = 1/32$ ; 3 –  $t_2(h)$  за  $\xi = 1/16$

Аналіз залежностей приведених на рис. 16, 17 для випадку  $i = 1$  від кроку коригування  $\xi$  дозволяє зробити наступні висновки: величина  $t_1$  стрімко зростає зі зростом відношення сигнал/шум  $h$  і зменшенням  $\xi$ . При заданому значенні  $h$  зменшення  $\xi$  приведе до збільшення середнього часу до зриву синхронізації. У випадку коли початковий стан системи має випадковий характер то для оцінювання якості пристрою синхронізації можна використати середній час до зриву синхронізації  $\bar{t} = 2 \sum_{i=1}^N t_i p_i$ .

Отже, підсумовуючи викладене, варто відмітити наступні результати досліджень:

**Висновки**

- з'ясовано, що таймерний сигнал, при реалізації умов синхронізації в засобах телекомунікацій, можна отримати з прийнятого інформаційного сигналу. Такий підхід є досить актуальним у випадку коли для зменшення впливу статистичної структури переданого кодового повідомлення на точність і час підтримки синхронізму використовують скремблювання. При цьому на передану послідовність можна накласти (заздалегідь відому) псевдовипадкову послідовність, а на прийомі провести віднімання даної послідовності з прийнятого сигналу;
- встановлено, що дисперсія максимальної правдоподібної оцінки спрацювання пристрою синхронізації з петлею яка працює за рішенням в 2,6 рази менша для відношення сигнал/шум яке дорівнює 10 дБ;
- з'ясовано, що статистична динаміка цифрового пристрою синхронізації на основі кола ФАП описується марківською моделлю із певним числом станів;
- отримано формалізоване подання нормованого часу до зриву синхронізації та стандартного відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум;
- аналіз залежностей відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум на виході фазового детектору дозволить встановити, що зменшення інтервалу коригування, тобто величини  $\xi$ , призведе до підвищення точності синхронізації. Крім того, як слідує з формули 21, збільшення смуги пропускання фільтруючого пристрою для зменшення спотворень сигналу, у випадку фіксованого відношення  $E / N_0$ , приведе до зниження точності синхронізації;
- аналіз залежностей зміни середнього часу до зриву синхронізації від відношення сигнал/шум для випадку  $i = 1$  та кроку коригування  $\xi$  дозволив встановити: величина  $t_1$  стрімко зростає зі зростом відношення сигнал/шум  $h$  і зменшенням  $\xi$ . При заданому значенні  $h$  зменшення  $\xi$  приведе до збільшення середнього часу до зриву синхронізації. У випадку коли початковий стан пристрою має випадковий характер, то для оцінювання якості пристрою синхронізації можна використати середній час до зриву синхронізації.

**Література**

1. Boiko J.M., Eromenko A.I., Tkacuk V.M. Optimization of receiver synchronization devices of protected telecommunication data transmission systems. Bulletin of Vinnica Polytechnical Institute. Vinnica. 2014. Ed. 6.



125–134 p.

2. Boiko J. M., Eromenko A. I. Synthesis problems of clock synchronization devices for receivers of satellite telecommunication data transmission systems. Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Series — Radiotechnique. Radioapparatus building. 2014. Ed. 58. 55–66 p.

3. Juliy Mikolayovych Boiko, Alexander Ivanovych Eromenko. Improvements Encoding Energy Benefit in Protected Telecommunication Data Transmission Channels. Scientific Journal «Communications». Science Publishing Group, USA. Vol. 2, No. 1, 2014, pp. 7–14. doi: 10.11648/j.com.20140201.12.

4. J. Boiko, O. Eromenko. Noise immunity assessment in telecommunication systems with cascade encoding structures. TCSET'2014 IEEE February 25 – March 1, 2014, Lviv – Slavske.

5. J. Boiko, O. Eromenko. Solutions Improve Signal Processing In Digital Satellite Communication Channels. 20<sup>th</sup> International IEEE Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, Poland, Gdansk, June 16–18, 2014.

6. Boiko J.M. Improving effectiveness for processing signals in data transmission channels with phase manipulation. 23rd International IEEE Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” September 9–13, 2013, Sevastopol.

7. Єрмоєнко О.І. Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах / О.І. Єрмоєнко, Ю.М. Бойко // Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції «ВОТТП-13-2014». – Одеса : Одес. нац. акад. зв'язку ім. Попова 6-12 червня, 2014. – С. 194–196.

8. Бойко Ю.М. Перспективи розвитку теорії пристроїв тактової синхронізації приймачів супутникових телекомунікаційних систем / Ю.М. Бойко, О.І. Єрмоєнко // V-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» МРФ-2014, 14–17-жовтня 2014 р. – Харків : ХНУРЕ. – С. 238–241.

9. Бойко Ю.М. Оцінка статистичних показників пристроїв тактової синхронізації засобів телекомунікацій / Ю.М. Бойко, О.І. Єрмоєнко // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”, PREDT – 2014, 23-25 жовтня 2014 р. – Чернівці : Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича. – С. 33.

10. Бойко Ю.М. Визначення впливу конфігурації фільтруючих пристроїв на завадостійкість телекомунікаційних систем передачі інформації / Ю.М. Бойко, О.І. Єрмоєнко // XII Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах КУСС – 2014», 14–16 жовтня 2014 р. – Вінниця : ВНТУ. – С. 95.

11. Шинкарук О.М. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації : [навч. посібник] / О.М. Шинкарук, Ю.М. Бойко, І.І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 245 с.

12. Шинкарук О.М. Приймання та оброблення сигналів : [навч. посібник] / О.М. Шинкарук, В.І. Правда, Ю.М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с.

#### References

1. Boiko J. M. Optimization of receiver synchronization devices of protected telecommunication data transmission systems /J. M. Boiko, A.I. Eromenko, V.M. Tkacuk //Bulletin of Vinnica Polytechnical Institute. – Vinnica. – 2014. - Ed. 6. - 125-134 p.

2. Boiko J. M., Eromenko A. I. Synthesis problems of clock synchronization devices for receivers of satellite telecommunication data transmission systems /J. M. Boiko, A.I. Eromenko //Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Series — Radiotechnique. Radioapparatus building. — 2014. — Ed. 58. — 55-66 p.

3. Juliy Mikolayovych Boiko, Alexander Ivanovych Eromenko. Improvements Encoding Energy Benefit in Protected Telecommunication Data Transmission Channels. Scientific Journal «Communications». Science Publishing Group, USA. Vol. 2, No. 1, 2014, pp. 7-14. doi: 10.11648/j.com.20140201.12.

4. J. Boiko, O. Eromenko. Noise immunity assessment in telecommunication systems with cascade encoding structures //TCSET'2014 IEEE February 25 – March 1, 2014, Lviv – Slavske.

5. J. Boiko, O. Eromenko. Solutions Improve Signal Processing In Digital Satellite Communication Channels //20th International IEEE Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, Poland, Gdansk, June 16-18, 2014.

6. Boiko J.M. Improving effectiveness for processing signals in data transmission channels with phase manipulation //23rd International IEEE Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” September 9-13, 2013, Sevastopol.

7. Eromenko O.I. Analiz modeley system sinchronizaciy u cifrovich priymachach /O.I. Eromenko, J.M. Boiko //VOTTP-13-2014. – Odessa: Odes. nac. akad. zv'yazku im. Popova 6-12 chervnya -2014. P. 194-196.

8. Boiko J.M. Perspektivi rozvitku teoryi pristroiv taktovoi sinchronizaciy priymachiv suputnikovich telekomunikaciynih system /J.M. Boiko, O.I. Eromenko //V th Miznarodnyi radioelektronniy forum “Prikladna radioelektronika. Stan ta perspektivi rozvitku” MRF-2014, 14-17 zovtnya 2014 r. Kharkiv, KNURE.

9. Boiko J.M. Ocinka statistichnih pokaznikov pristroiv taktovoi sinchronizaciy zasobiv telekomunikaciy /J.M. Boiko, O.I. Eromenko //Materialy naukovo-praktichnoi konferenciy “Fiziko-technologichni problemy radiotechnichnih pristroiv, zasobiv telekomunikaciy, nano- ta mikroelektroniki”, PREDT-2014, 23-25 zovtnya 2014 r. Chernivci, Chernivec'kiy nacionalniy universytet im. Juriya Fed'kovicha. – P. 33.

10. Boiko J. M. Viznachennya vplyvu konfiguraciyi filtrujuchich pristroyv na zavadostiykist' telekomunikaciynih system peredachi informaciy /J.M. Boiko, O.I. Eromenko //XII Miznarodna konferenciya “Kontrol i upravlinya v skladnych systemach” KUSS – 2014, 14-16 zovtnya 2014 r. Vinnica, VNTU. P. 95.

11. Shinkaruk O.M., Boiko J.M., Chesanovskii I.I. Osnovi funkcionuvannya bagatokanalnich sistem peredachi informacii: navch. posibnik dlya studentiv vichih navchalnih zakladiv. Khmel'nitskii, KNU, 2011. – 245 p.

12. Shinkaruk O.M., Pravda V.I., Boiko J.M. Primannya ta obroblennya signaliv: navch. posibnik dlya studentiv vichih navchalnih zakladiv. Khmel'nitskii, KNU, 2013. – 365 p.

Рецензія/Peer review : 19.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

## ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ВИБОРУ НАЙПРИДАТНІШОГО СУПЕРВІЗОРА ЖИВЛЕННЯ

*В даній роботі запропоновано програмний засіб для вибору найпридатнішого за основними технічними параметрами супервізора живлення із множини існуючих залежно від вимог користувача. Його використання значно полегшує і прискорює процес вибору необхідної за багатьма параметрами моделі.*

*Ключові слова: супервізор живлення, умовні критерії подібності, енергетичний резерв.*

M.V. CHICHUZHKO

Cherkassy State Technological University

### SOFTWARE TOOL FOR SELECT OF THE MOST SUITABLE SUPERVISORY CIRCUITS

*Abstract - In this article is proposed the creation of software tool for selecting the most suitable model by many features of supervisor circuit model of existing variety, depending on user requirements. To achieve this goal have been resolved following tasks: was created a database of modern supervisors circuit by different manufacturers, which includes their main technical parameters; was proposed generalized mathematical model of the relationships between these parameters; was used the features of theory of incomplete divisibility and dimensions for physical modelling; were proposed conditional similarity criteria and created criterion equation; was built signed model of depending the main technical parameters in dimensionless coordinates for different types of supervisors circuit; were defined supervisors circuits that have the biggest reserve for energy and speed parameters, depending on user requirements. Developed software tool greatly facilitates and accelerates the user's selecting the desired model in many parameters.*

*Keywords: the supervisory circuits, conditional similarity criteria, the power reserve*

#### Актуальність теми

Ефективним методом контролю над напругою живлення та автоматичної підтримки роботи спеціалізованих комп'ютерних систем є використання зовнішньої мікросхеми супервізора живлення або внутрішньої, яка вбудована в морфоструктуру мікроконтролера. Не зважаючи на те, що більшість сучасних мікроконтролерів вже мають у своєму складі вбудовані модулі POR (power on reset) і BOR (brown out reset), використання зовнішніх супервізорів виправдано з наступних міркувань:

- струм живлення зовнішнього супервізора в сотні раз менше в порівнянні зі споживанням при підключенні внутрішніх функцій POR і BOR, що пов'язано, в першу чергу, з технологією виробництва мікроконтролерів та аналогових мікросхем;

- кількість точок моніторингу рівня напруги живлення для керування МК в 2–4 рази більше [5].

В теперішній час, виробники конкурують за зниження енергоспоживання. Тому зовнішній супервізор живлення, який необхідний для надійної роботи мікроконтролера та має значно меншу потужність споживання ніж вбудований, надає значну перевагу при використанні в портативній і малопотужній апаратурі з живленням від батарей і акумуляторів. Проблемою є велика кількість типів супервізорів живлення, з яких необхідно обрати найпридатніший за відповідними параметрами для подальшого використання в сучасній мікропроцесорній техніці.

Отже, розробка програмного засобу для вибору найпридатнішої моделі супервізора живлення із множини існуючих, в залежності від вимог користувача, що значно прискорить та полегшить процес вибору необхідної за багатьма параметрами моделі, є актуальною задачею.

#### Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка програмного засобу для вибору найпридатнішої за багатьма параметрами моделі супервізора живлення із множини існуючих.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

1. Створити базу даних сучасних супервізорів живлення різних фірм виробників, яка включає в себе їх основні технічні параметри.

2. Скласти узагальнену математичну модель залежностей між цими параметрами. При відсутності залежностей використати властивості теорії неповної подібності та розмірностей для фізичного моделювання.

3. Запропонувати умовні критерії подібності та створити критеріальне рівняння.

4. Використовуючи розрахунки потужності розсіювання та значень умовних критеріїв подібності, побудувати графік залежностей основних технічних параметрів в безрозмірних координатах для різних типів супервізорів живлення.

5. В залежності від вимог користувача, визначити супервізори живлення, які мають найкращі енергетичні та швидкісні показники.

#### Розв'язання задачі

Для розв'язання поставлених задач створюється перелік сучасних супервізорів живлення різних моделей найбільш відомих фірм: Microchip, Texas Instrument з основними технічними параметрами, які представлені на рис. 1 (умови обмеження: в перелік включаються супервізори з  $f = 20$  МГц).

Узагальнений математичний опис параметрів супервізорів живлення має наступний вигляд:



$$F(P_p, U, I, f, t_{30}) = 0, \tag{1}$$

де  $P_p$  – потужність розсіювання, яка обчислюється за формулою  $P_p = (150 - T_c) / 0,23$ ;  $T_c$  – максимальна температура, °C;  $U$  – максимально допустима робоча напруга, В;  $I$  – максимально допустимий робочий струм, мА;  $f$  – максимально допустима робоча частота, МГц;  $t_{30}$  – час обробки аналогової величини, мкс.

З рівняння (1) видно відсутність залежностей між часом обробки аналогової величини, максимальною робочою частотою, максимальною робочою напругою та максимальним робочим струмом, які є одними з основних параметрів супервізорів. Розглянуті супервізори є фізичними моделями, що дозволяє використовувати фізичне моделювання на базі теорії неповної подібності та розмірностей для розв’язку поставлених задач [1].

Назва	T <sub>c</sub> , °C	U, В	I, мА	t <sub>зд</sub> , мкс	f, МГц	P <sub>p</sub> , мВт	P <sub>p</sub> /(U·I)	f·t <sub>зд</sub>	
LM3723	85	5	0.4	0.19	20	282.61	141.31	3.80	
LP3470	85	4.3	0.31	0.18	20	282.61	212.01	3.60	
LM3713	125	3.3	0.18	0.2	20	108.7	183.00	4.00	
LM809	85	4.7	0.33	0.24	20	282.61	182.21	4.80	
LMC6953	85	6	0.51	0.1	20	282.61	92.36	2.00	
LM3709	85	3.3	0.22	0.2	20	282.61	399.27	4.00	
LM3705	85	2.5	0.11	0.2	20	282.61	1027.67	4.00	

Рис. 1. Інтерфейс програми – основні технічні параметри супервізорів живлення різних моделей та значення умовних критеріїв

На основі евристичного методу та фізичного моделювання створюються умовні критерії подібності, яким призначаються наступні фізичні тлумачення:

$(P_p / (U \cdot I))$  – величина, яка характеризує енергетичний резерв супервізора;

$(f \cdot t_{30})$  – величина, яка характеризує швидкість супервізора живлення [2, 6].

На підставі визначених умовних критеріїв подібності створено критеріальне рівняння, яке має наступний вигляд [3, 4]:

$$\psi(P_p / (U \cdot I); (f \cdot t_{30})) = 0. \tag{2}$$

За результатами розрахунків значень умовних критеріїв будується графік залежностей основних технічних параметрів в безрозмірних координатах для різних типів супервізорів живлення, який зображений на рис. 2.

Запропонований програмний засіб універсальний, тобто може застосовуватись для будь-яких компонентів мікропроцесорних систем, база даних має можливість доповнюватись (рис. 3). Для спеціалістів, які займаються питаннями комплектації при проектуванні проблемно-орієнтованих систем це значно полегшує і прискорює процес вибору необхідної за багатьма параметрами моделі.

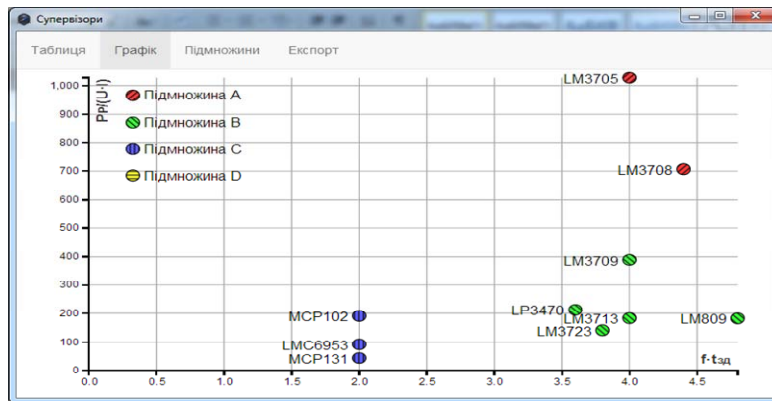


Рис. 2. Графік енергетичних та швидкісних характеристик супервізорів живлення

Технології, що використовувались під час створення програмного засобу: Node-webkit – використовується для створення exe файлу; Require.js – модульність проекту; Bootstrap – зовнішній вигляд; D3.js – використовується для побудови графіку; List.js – використовується для полегшення роботи з таблицями.

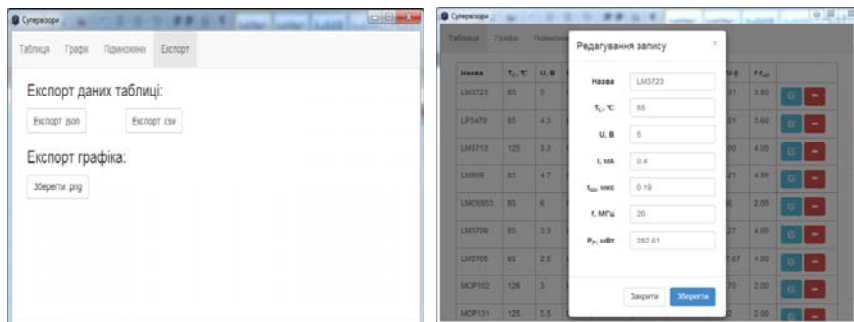


Рис. 3. Інтерфейс редагування та збереження даних програми в різних форматах

Використовуючи розроблений програмний засіб, обираємо таку модель супервізора живлення, яка має найкращі енергетичні та швидкісні показники та задовольняє вимоги користувача (рис. 4). В даному випадку це супервізори живлення, які належать до підмножини А.

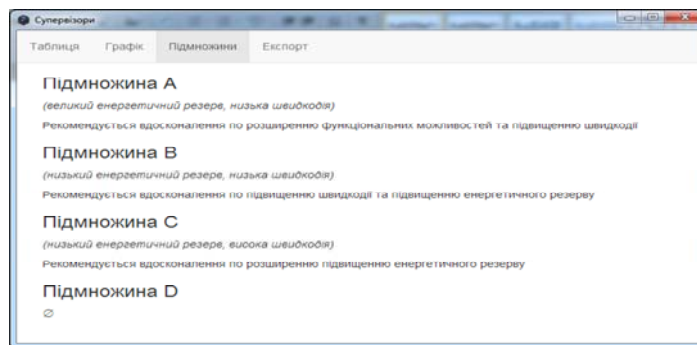


Рис. 4. Розподіл супервізорів живлення за їх характеристиками

### Висновки

Запропоновано програмний засіб для вибору найпридатнішої за багатьма параметрами моделі супервізора живлення із множини існуючих, створено перелік визначальних величин та умовних критеріїв із основних технічних параметрів, створено критеріальне рівняння, побудовано графік залежностей основних технічних параметрів в безрозмірних координатах для різних типів сучасних супервізорів живлення.

### Література

1. Лукашенко А.Г. Фізична науково-технічна модель дослідження мікроконтролерів / А.Г. Лукашенко, М.В. Чичужко, В.М. Лукашенко // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2014. – № 47(1). – С. 137–144.
2. Лукашенко В.М. Метод розширення функціональних можливостей сучасних мікроконтролерів / В.М. Лукашенко, М.В. Чичужко, Д.А. Лукашенко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки – Хмельницький : ХНУ, 2013. – № 6. – С. 186–189.
3. Лукашенко В.М. Многокритериальная качественная оценка фирм изготовителей микроконтроллеров / В.М. Лукашенко, М.В. Чичужко, В.А. Лукашенко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ, 2013. – Вип. 26. – С. 155–160.
4. Лукашенко В.М. Системний аналіз сучасних моделей супервізорів та визначення напрямку їх вдосконалення / В.М. Лукашенко, М.В. Чичужко, А.Г. Лукашенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки. – Черкаси : ЧДТУ, 2013. – № 4. – С. 33–37.
5. Салов М. Analog Devices: прецизионные супервизоры и секвенсоры / М. Салов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 10. – С. 20–24.
6. Чичужко М.В. Методика вдосконалення мікроконтролерів / В.А. Лукашенко, І.А. Зубко, В.М. Лукашенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки. – Черкаси : ЧДТУ, 2014. – № 3. – С. 57–63.

### References

1. Lukashenko A.H. Fizychna naukovo-tekhnichna model doslidzhennia mikrokontroleriv / A.H. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, V.M. Lukashenko // Visnyk NTUU "KPI". Seriya pryladobuduvannia. – 2014. – No. 47(1). – pp. 137-144.
2. Lukashenko V.M. Metod rozshyrennia funktsionalnykh mozhlyvostey suchasnykh mikrokontroleriv / V.M. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, D.A. Lukashenko // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnytsky. 2013. Issue 6. – pp. 186–189.
3. Lukashenko V.M. Mnohokryterialnaia kachestvennaia otsenka firm yzgotovytelei mykrokontrolerov / V.M. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, V.A. Lukashenko // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. – Kirovohrad : KNTU, 2013. – Issue. 26. – pp. 155–160.
4. Lukashenko V.M. Systemnyi analiz suchasnykh modelei supervizoriv ta vyznachennia napriamku yikh vdoskonalennia / V.M. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, A.G. Lukashenko // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky. – Cherkassy : ChDTU, 2013. – Issue 4. – pp. 33–37.
5. Salov M. Analog Devices: pretsyzyonnye supervizory y sekvensory / M. Salov // Komponenty i tekhnolohy. – 2009. – Issue. 10. – pp. 20–24.
6. Chichuzhko M.V. Metodyka vdoskonalennia mikrokontroleriv / V.A. Lukashenko, I. A. Zubko, V. M. Lukashenko // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky. – Cherkasy : ChDTU, 2014. – Issue 3. – pp. 57–63.

Рецензія/Peer review : 19.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф., Лукашенко В.М.

УДК 621.317:006.354

В.С. ОСАДЧУК, Ю.С. КРАВЧЕНКО, В.І. КОЛОМІЄЦЬ, І.О. ЧЕХІВСЬКИЙ  
Вінницький національний технічний університет

## ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА РОБОТУ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ. Ч.1. ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕКОМБІНАЦІЙНІ ВТРАТИ В АКТИВНІЙ І ПАСИВНІЙ БАЗІ

Аналітичним шляхом досліджено вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора. Окремо проаналізовано вплив випромінювання на радіаційні втрати в активній і пасивній базі транзистора. Показано, що основним джерелом радіаційних втрат в активній базі є збільшення часу життя  $\tau$  неврівноважених носіїв заряду. В той же час, радіаційні втрати в пасивній базі транзистора, в основному, також пов'язані зі зміною часу життя носіїв заряду, але цей вплив не такий значний, як в активній.

Ключові слова: радіація, радіаційні втрати, біполярний транзистор, активна і пасивна база біполярного транзистора.

V.S. OSADCHUK, YU.S. KRAVCHENKO, V.I. KOLOMIETS, I.O. CHEKHIVS'KIY  
Vinnitsia National Technical University

### EFFECT OF RADIATION ON BIPOLAR TRANSISTOR WORK. PART 1. INFLUENCE RADIATION ON RECOMBINATION LOSSES IN ACTIVE AND PASSIVE BASE

Abstract – The effect of radiation influencing on the operations in semiconductor devices, including radiation losses in the base of transistor was analytically investigated. Emission influencing on the radiation losses in the emitter, in the volume charge layer of emitter junction and on the transistor surface was analyzed separately. It is shown that recombination losses in thin emitter does not depend on radiation and recombination losses on the surface of the transistor depend on the values of the radiation surface recombination velocity change and therefore depend on absorbed dose of radiation.

Keywords: radiation, radiation loss bipolar transistor active and passive base bipolar transistor.

#### Вступ

Дія радіації на роботу напівпровідникових приладів [1–6], насамперед, пов'язана з появою в структурі напівпровідника зворотних та незворотних радіаційних ефектів, які призводять до змін їх електрофізичних параметрів, ускладнюючи умови ефективного використання різноманітних електронних засобів, що знаходяться в зоні такого впливу [8–16]. В той же час, деякі з цих ефектів, що мають зворотний характер і пов'язані з короткочасним зростанням концентрації вільних носіїв заряду, а, значить, і короткочасною зміною параметрів відповідного електронного пристрою, можуть бути використані для створення сенсорів радіації [7].

Мета даної роботи – дослідити вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора.

#### Вплив радіації на коефіцієнт передачі струму транзистора.

Основним параметром, важливим для будь-якого транзистора є коефіцієнт передачі струму  $h_{21}$ , тобто відношення вихідного струму до вхідного. Для зручності розглянемо транзистор включений за схемою зі спільним емітером. Розрахунок транзистора проводиться за методом поданим в літературі [17]. Розрізняють статичний  $h_{21E}$  і диференційний  $h_{21e}$  коефіцієнт передачі струму:

$$h_{21E} = \left. \frac{j_K}{j_B} \right|_{j_K = const, V_{K-E} = const}; \quad h_{21e} = \left. \frac{dj_K}{dj_B} \right|_{j_K = const, V_{K-E} = const} \quad (1)$$

де  $j_K$  – струм колектора (вихідний струм),

$j_B$  – струм бази (вхідний),

$V_{K-E}$  – напруга колектор – емітер (вихідна напруга).

Як відомо, в стаціонарному активному (підсилювальному) стані режимі весь струм бази витрачається на підтримку процесів рекомбінації в транзисторі. Оскільки коефіцієнт передачі залежить від режиму по постійному струму (тобто від комбінації значень  $j_K$  та  $V_{K-E}$ ), то чим інтенсивніше проходять процеси рекомбінації, тим більшим буде струм бази і, як наслідок, меншим коефіцієнт передачі струму. З огляду на конструкцію транзистора (рис. 1)

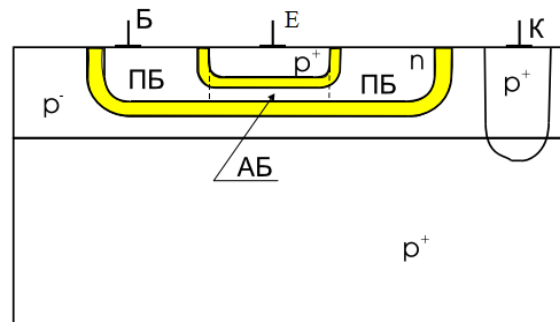


Рис. 1. Типова конструкція р-п-р-транзистора

$$j_B = j_A + j_{II} + j_{EII} + j_I + j_S, \quad (2)$$

де  $j_A, j_{II}, j_{EII}, j_I, j_S$  – струми рекомбінації в активній та пасивній базі, в шарі просторового заряду

емітерного переходу, в емітері (пов'язаний з зустрічною інжекцією електронів з бази в емітер), на поверхні кристалу.

Враховуючи (1) і (2) зручніше аналізувати зворотній коефіцієнт передачі струму:

$$\frac{1}{h_{21E}} = \frac{J_B}{J_K} = \frac{J_A}{J_K} + \frac{J_{II}}{J_K} + \frac{J_{EII}}{J_K} + \frac{J_I}{J_K} + \frac{J_S}{J_K}, \quad (3)$$

де  $AB$  і  $ПБ$  – відповідно активна і пасивна база,  
 $E, B, K$  – емітер, база, колектор.

Для визначеності розглянемо  $p$ - $n$ - $p$  транзистор. Оскільки всі дірки на шляху від емітера до колектора слід віднести до втрат, то кожен доданок в (3) – рекомбінаційні втрати в певній області [18]. Тоді запишемо:

$$\frac{1}{h_{21E}} = R_A + R_B + R_{EII} + R_I + R_S, \quad (4)$$

Оскільки при опроміненні в транзисторі найбільше змінюється час життя неврівноважених носіїв заряду, то відповідно, змінюються і рекомбінаційні втрати, а отже і  $h_{21E}$ .

### Вплив радіаційного випромінювання на рекомбінаційні втрати в активній базі

Відповідно (3) і (4)  $R_A = \frac{J_A}{j_K}$ . Частину базового струму пов'язану з рекомбінацією в активній базі знаходимо зі співвідношення [18]:

$$J_A = qS_{EA} \int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau(x)} dx, \quad (5)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $S_{EA}$  – площа емітера, що межує з активною базою,  $W_A$  – товщина активної бази,  $p(x)$  – розподіл неосновних носіїв заряду від координат в активній базі,  $\tau(x)$  – залежність часу життя неврівноважених носіїв заряду від координат.

Для визначення струму колектора введемо поняття часу прольоту неосновних носіїв заряду через активну базу транзистора:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{dx}{v_x(x)}, \quad (6)$$

де  $v_x$  – направлена по осі  $x$  швидкість переміщення інжектованих з емітера в базу неосновних носіїв заряду.

Чисельник і знаменник в (6) помножимо на  $qS_{EA}p(x)$ , отримаємо:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{qS_{EA}p(x)}{v_x(x)qS_{EA}p(x)} dx, \quad (7)$$

В знаменнику отримаємо струм дірок як функція координати  $J_p(x)$ . Оскільки коефіцієнт переносу неосновних носіїв через базу наближається до одиниці, то прийmemo  $J_p(x) = const$ . Якщо врахувати, що коефіцієнт передачі струму в схемі зі спільною базою також близький до одиниці, тоді можн вважати, що  $J_p(x) = J_E = J_K$ . Тоді (7) перепишемо:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{qS_{EA}p(x)dx}{j_K}, \quad (8)$$

чисельником (8) є повний заряд дірок, інжектованих емітером в активну базу  $Q_A$ . Отже:

$$j_K = \frac{Q_A}{t_A}. \quad (9)$$

Враховуючи (5) і (9) отримаємо:

$$R_A = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx}. \quad (10)$$

Тепер розглянемо, що у виразі (10) залежить від опромінення. Як відомо, найбільш чутливим до радіаційного впливу параметром напівпровідника є час життя  $\tau$  неврівноважених носіїв заряду [18]. Цю залежність  $\tau$  від потоку  $\Phi$  визначається напівемпіричним виразом:

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (11)$$

де  $\tau_0$  – початковий час життя неосновних носіїв заряду в активній базі транзистора,  $\tau_\phi$  – після опромінення потоком  $\Phi$ ,  $k_\tau$  – коефіцієнт радіаційних змін часу життя, що залежить від виду радіаційного впливу.

Розподіл інжектованих в базу носіїв заряду  $p(x)$ , залежить від розподілення по базі типозадаючої домішки і від середньої рухливості ( $D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$ ) неосновних носіїв заряду в базі. Обидва цих параметра залежать від опромінення, але зміни рухливості можна вважати ефектом третього порядку меншості і ним можна знехтувати. Зміна ефективної концентрації типозадаючої домішки – ефект другого порядку меншості і його слід враховувати лише при низькому рівні легування, що для активної бази, де концентрація домішки порядку  $(10^{16} - 10^{18}) \text{ см}^{-3}$ , не характерно.

Враховуючи вище перераховане, можна зробити висновок, що  $p(x)$ , від опромінення практично не залежить.

Час прольоту  $t_A$  також залежить від низько чутливих до опромінення параметрів і, відповідно, на фоні змін часу життя змінами часу прольоту можна знехтувати.

Таким чином враховуючи (10) і (11) запишемо:

$$R_{A\Phi} = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau_\phi(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx} = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau_0(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx} + t_A \Phi \frac{\int_0^{W_A} k_\tau(x) p(x) dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx}, \quad (12)$$

Перший доданок в (12) це початкові рекомбінаційні втрати в активній базі, другий – додаткові втрати при опроміненні.

#### Вплив радіаційного випромінювання на рекомбінаційні втрати в пасивній базі

На Рис. 2 зображено фрагмент пасивної бази. Будемо вважати, що всі носії заряду, інжектовані з емітера в пасивну базу, в ній і рекомбінують. При цьому можна використовувати одномірне наближення, якого достатньо для інженерних розрахунків [19].

Вважатимемо, що легування бази в напрямку осі  $y$  не змінюється, а залежить лише від  $x$ . Оскільки розмір пасивної бази в напрямку  $y$ , набагато більше дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, то можна вважати, що з бічної сторони емітерного переходу дірки інжектуються в напівбезкінечне середовище. Тоді їх розподіл по координатам буде експонентним:

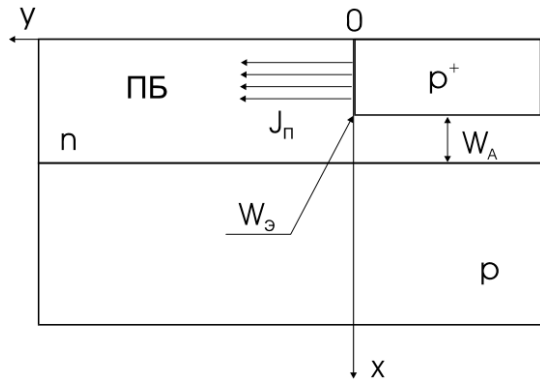


Рис. 2. Одномірна модель струму  $J_n$

$$p_n(y) = p(0) \exp\left(-\frac{y}{L_n}\right). \quad (13)$$

Граничне значення дірок  $p(0)$  при  $y=0$  визначається співвідношенням:

$$p(0) = p_{n0}(x) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right). \quad (14)$$

де  $p_{n0}$  – рівноважна концентрація дірок в базі, яка залежить від координати  $x$ . Введемо поняття середньої концентрації домішки в пасивній базі, і відповідно середнє значення інжектованих носіїв.

$$\begin{aligned} \bar{p}(0) &= \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} p(x) \Big|_{y=0} dx = \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} p_{n0}(x) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) dx = \\ &= \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} \frac{n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}{N_{II}(x)} dx = \frac{n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}{W_E} \int_0^{W_E} \frac{1}{N_{II}(x)} dx = n_i^2 \frac{1}{N_{II}(x)} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right), \end{aligned} \quad (15)$$

де  $N_{II}$  – концентрація типозадаючої домішки в пасивній базі.

Знаючи розподіл дірок визначимо струм  $J_{II}$ .

Враховуючи, що швидкість рекомбінації нерівноважених носіїв заряду визначається співвідношенням:

$$r(x, y) = \frac{\Delta p(x, y)}{\tau_{II}}, \quad (16)$$

де  $\bar{\tau}_{\Pi}$  – середнє значення часу життя в пасивній базі. Загальна кількість дірок, рекомбінуючи в усій пасивній базі буде рівною:

$$S_{E\Pi} \int_0^{\infty} \int_0^{W_E} \frac{\Delta p(x, y)}{\tau_{\Pi}} dx dy, \quad (17)$$

де  $S_{E\Pi}$  – площа емітерного переходу, що межує з пасивною базою. Враховуючи, що рівноважна концентрація неосновних носіїв заряду в пасивній базі дуже мала, то нею можна знехтувати і вважати, що  $\Delta p(x, y) = p_n(x, y)$ . Розподіл концентрацій неосновних носіїв заряду з врахуванням (13), (14), (15) можна звести до функції однієї змінної:

$$p(x, y) = p(y) = n_i^2 \left( \frac{\bar{1}}{N_{\Pi}(x)} \right) \exp\left( \frac{qV_{EB}}{kT} \right) \exp\left( -\frac{y}{L_n} \right). \quad (18)$$

Тоді складова струму бази, що забезпечує рекомбінацію в пасивній базі з врахуванням (17) і (18), буде рівна:

$$J_{\Pi} = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2}{\bar{L}_{\Pi}} \left( \frac{\bar{1}}{N_{\Pi}(x)} \right) \exp\left( \frac{qV_{EB}}{kT} \right). \quad (19)$$

Тепер використовуючи вираз для струму колектора ( $J_K = J_d \exp \exp\left( \frac{qV_{EB}}{kT} \right)$ ) визначимо рекомбінаційні втрати в пасивній базі:

$$R_{\Pi} = \frac{j_{\Pi}}{j_K} = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2}{\bar{L}_{\Pi} J_d} \left( \frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right) = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2 \bar{N}_A W_A}{\bar{L}_{\Pi} qS_{EA} \bar{D}_A n_i^2} \left( \frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right) = \frac{S_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} W_A}{S_{EA} \bar{D}_A \bar{L}_{\Pi}} \bar{N}_A \left( \frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right). \quad (20)$$

Оскільки  $\bar{L}_{\Pi} = \sqrt{\bar{D}_{\Pi} + \bar{\tau}_{\Pi}}$ , то з врахуванням (11) запишемо залежність  $R_{\Pi}(\Phi)$  в вигляді:

$$R_{\Pi}(\Phi) = R_{\Pi 0} \sqrt{1 + k_{\tau\Pi} \bar{\tau}_{\Pi 0} \Phi}. \quad (21)$$

де  $k_{\tau\Pi}$  – коефіцієнт радіаційної зміни часу життя в пасивній базі.

### Висновок

Аналітичним шляхом досліджено вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора. Особливо проаналізовано вплив випромінювання на радіаційні втрати в активній і пасивній базі транзистора. Показано, що основним джерелом радіаційних втрат в активній базі є збільшення часу життя  $\tau$  нерівноважених носіїв заряду. В той же час, радіаційні втрати в пасивній базі транзистора, в основному, теж пов'язані зі зміною часу життя носіїв заряду в пасивній базі, але цей вплив не такий значний як в активній.

### Література

1. Брудный В. Н. Влияние облучения электронами на электрические свойства арсенида галлия / В. Н. Брудный, С. В. Малянов, М. А. Кривов // Изв. Вузов. Физика. – 1966. – С. 132–134.
2. Брудный В. Н. Электрические и рекомбинационные свойства  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , облученого электронами / В.Н. Брудный, А. В. Войцеховский, М.А. Кривов // ФТП. – 1977. – С. 1540–1544.
3. Кононов Б. А. Радиационная физика неметаллических кристаллов : т.3, ч.2 / Б. А. Кононов, В. К. Струц. – К. : Наукова думка, 1971. – С. 154.
4. Кумахов М. А. Множественные процессы в теории взаимодействия ядерных частиц с кристаллами : дис. ... канд. физ.-мат. наук / М. А. Кумахов / НИИЯФ, МГУ. – 1969.
5. Винецкий В. Л. Радиационная физика полупроводников / В. Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. – К. : Наукова думка, 1976. – С. 336.
6. Хіврич В.І. Ефекти компенсації в напівпровідниках та сенсори радіації на цій основі : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук / В.І. Хіврич. – Одеса : ОНУМ, –2006. – 25 с.
7. Будяшкіна С. В. Радиационные эквиваленты при действии ядерных излучений на материалы электроники. / С. В. Будяшкіна, В. И. Звягин, В. М. Ленченко// Физическая химия в микроэлектронике. – Красноярск, 1976, – С. 3–21.
8. Губская В. И. Особенности радиационного дефектообразования в кремнии при альфа-облучении. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиац. повреждений и радиац. Материаловедение / В. И. Губская, П. В. Кучинский, В. М. Ломако, А.П. Петрунин. – М., 1981. – С. 8.



9. Аброян И.А. Распределение дефектов по глубине при облучении кремния легкими ионами / И.А. Аброян, А.И. Титов // Ионная имплантация. Второй Советско-Американский семинар. – Новосибирск, 1979. – С. 335–350.
10. Ходжаев Т. А. Исследование кинетики накопления радиационных дефектов / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, К. Д. Джанобилов // Физика конденсированных средств : материалы научной конференции, посвященной памяти д.т.н. проф. Гафурова О. В. – Душанбе, 1999. – С. 53–55.
11. Ходжаев Т. А. Исследование кинетики введения дефектов Si n- и р- типа / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Межд. науч. тех. конф. «Физико-химическая исследования полупроводниковых диэлектрических и композиционных материалов». – Куляб, 2001. – С. 3.
12. Ходжаев Т. А. Образование радиационных дефектов в облученном Р-кремнии / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Межд. науч. тех. конф. «Физико-химическая исследования полупроводниковых диэлектрических и композиционных материалов». – Куляб, 2001. – Куляб, – 2001. – С. 5.
13. Ходжаев Т. А. Природа образования радиационных дефектов в облученном р- кремнии / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Материалы межд. конф. «Современные проблемы физико-механических свойств конденсированных сред». – Худжанд, 2002. – С. 112–114.
14. . Першенков В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных схем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М. : Энергоатомиздат, Москва, 1986, – С. 256.
15. Лубченко А. Ф. Физические основы радиационной технологии твердотельных электронных приборов / А. Ф. Лубченко, В. А. Гирий, В. М. Кулаков. – К. : Наукова Думка, 1976. – С. 200.
16. Брудный В.Н. Радиационные дефекты в арсениде галлия (обзор) / В.Н. Брудный, М.А. Кривов // Изв. Вузов. Физика. – 1980. – С. 64–75.
17. Кравченко Ю.С. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Твердотільна електроніка» щодо розрахунків транзисторів і транзисторних структур для студентів напрямів “Мікро- та наноелектроніка” і “Електронні пристрої та системи” : навчальний посібник / Ю.С. Кравченко, С.Ю. Кравченко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 60.
18. Вологдин Е.Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов : навчальний посібник / Е.Н. Вологдин, А. П. Лисенко. – М. : НОЦ, 1999. – С. 101.
19. Холодарь Г. А. Непрямая рекомбинация вакансий и междоузельных атомов в облученном кремнии / Г. А. Холодарь, Ю. В. Данковский, В. В. Конопляных. – Винецкий В ФТП, 1976. – С. 1712 –1718.

## References

1. Brudnyy V. N. Vplyv olucheny elektronamy na elektrichni vlastyivosti arsenidu haliyu / V. N Brudnyy, S. V. Malyanov , M. A. Kryvov – Yzv. Vuziv. Fyzyka. – 1966 – P. 132–134.
2. Brudnyy V. N., Elektrichni ta rekombinatsyionnye vlastyivosti CdxHgl – XTE , oprominennya elektronamy / V. N Brudnyy, A. V. Voytsekhovskyy , M. A. Kryvov ta in . – FTP. 1977. T. 11. Vyp. 8. – P. 1540–1544.
3. Kononov B. A. Radiatsiyana fizyka nemetalichnykh krystaliv. t.z , ch.2 / B. A. Kononov, V. K. Struts , – Kyiv, Naukova dumka, – 1971. – P. 154.
4. Kumiv M. A. Mnozhynni protsesy v teoriiyi vzyayemodiyi yadernykh chastok z krystalamy. / M. A. Kumiv – Dyss. kand. fiz.mat . nauk, NDIYAF , MHU, – 1969
5. Vynetskaya V. L. Radiatsiyana fizyka napivprovodnykiv / V. L. Vynetskaya , H. A Kholodar – Naukova dumka . – 1976, – P. 336.
6. Khivrych V.I. Efekty kompensatsiyi u napivprovodnykakh ta sensoriv radiatsiyi na Tsiy Osnovi : avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovoho stupeniv doktora fizyko–matematychnykh nauk / V.I. Khivrych – Odesa : Onuma , – 2006. – P. 25.
7. Budyashkina S. V. Radiatsiyani ekvivalenty pry diyi yadernykh vyprominyuvan na materialy elektroniky. V kn . : Fyzichna khimiya v mikroelektronitsi / S. V. Budyashkina , V. I. Zvyahin , V. M. Lenchenko , – Krasnoyarsk , – 1976, – P. 3–21.
8. Hubska V. I. Osoblyvosti radiatsiyonno defektoutvorennya v kremniyi pry alfa– oprominenni . Pytannya atomnoyi nauky i tekhniki, ser. : Fyzyka radyats . poshkodzhen i radyats . Materialoznavstvo / V. I. Hubska , P. V. Kuchynskyy, V. M. Lomako , A.P. Petrunyn . – 1981, – P. 8.
9. Abroyan I.A. Rozpodil defektiv po hlybini pry oprominenni kremniyu lehkyymi ionamy . V kn . : Ionna implantatsiya . Druhyy Radyansko – Amerykansky seminar . / I.A. Abroyan , A.I Tytov – Novosybirsk, – 1979, – P.335–350.
10. Khodzhaev T. A. Doslidzhennya kinetyky nakopychennya radiatsiynykh defektiv. Materialy naukovoyi konferentsiyi / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , K. D. Dzhano bilov – «Fyzyka kondensovanykh zasobiv» svyashchennoyi pam'yati d.t.n. prof. Hafurova V. Dushanbe , – 1999, – P. 53–55.
11. Khodzhaev T. A. Doslidzhennya kinetyky vvodennya defektiv Si n– i r– typu. Mezhd. nauch. tekhn. konf. «Fyziko – khimichna doslidzhennya napivprovodnykovykh dielektrychnykh i kompozytsiynykh materialiv». / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Kulyab , – 2001. – P. 3.
12. Khodzhaev T. A. Osvita radiatsiynykh defektiv v oprominenomu R– kremniyi . Mezhd. nauch. tekhn. konf. «Fyziko – khimichna doslidzhennya napivprovodnykovykh , dielektrychnykh i kompozytsiynykh materialiv». / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Kulyab , – 2001. – P. 5.
13. Khodzhaev T. A. Pryroda osvity radiatsiynykh defektiv v oprominenomu r– kremniyi . Materialy mezhd. konf. «Suchasni problemy fizyko–mekhanichnykh vlastyivostey kondensovanykh seredovysykh » . / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Khudzhand – 2002. – P. 112–114.
14. . Pershenkov V. S. Poverkhnevi radiatsiyani efekty v elementakh intehralnykh skhem. / V.S. Pershenkov, V.D. Popov, A.V. Shalnov. – M. : Vyshcha shkola, – 1986, – P. 256.
15. Lubchenko A. F. Fyzichni osnovy radiatsiynoyi tekhnolohiyi tvordotilnykh elektronnykh pryladiv. / A.F. Lubchenko , V.A. Hiryi, V. M. Kulakov. ta in – Kyiv : Naukova Dumka , – 1976. – P. 200.
16. Brudnyy V.N. Radiatsiyani defekty v arsenidi Haliya (ohlyad) / V.M. Brudnyy, M.A. Kryvov – Yzv. Vuziv. Fyzyka. – 1980. – P. 64–75.
17. Osadchuk V.S., Osadchuk V.O. Tranzystory . – Vinnytsya , VDTU, – 2003.
18. Volohdin E.N. Radiatsiyana stiykist bipolyarnykh tranzystoriv : navchalnyy posibnyk / O.M. Volohdin , A. P. Lysenko – Moskva: NOTS , –1999. – P. 101
19. . Kholodar H. A. Nepryama rekombinatsiya vakansiy i mezhdouzelynykh atomiv v oprominenomu kremniyi . / H. A. Kholodar , YU. V. Dankovskyy , V. V. Konoplyanykh , – Vynetskaya U FTP , – 1976 , – P. 1712 –1718.

В.А. ЛУКАШЕНКО, А.Г. ЛУКАШЕНКО  
Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона, м. Київ, Україна  
В.М. СПІВАК  
Національний технічний університет України «КПІ»

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ СОПРОЦЕСОРІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ, ПРЕЦИЗІЙНИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ

*В роботі запропонована систематизація апаратно-орієнтованих методів і технічних принципів побудови моделей компонентів мікропроцесорних систем для проблемно-орієнтованої апаратури. Характерною особливістю цих моделей є можливість забезпечення вимог виконання операцій одночасно з високою швидкістю, прецизійністю, високою надійністю та низькою вартістю обчислювачів, функціональних перетворювачів та перетворювачів кодів, завдяки побудові їх на основі сукупності прийомів, ознак та засобів таблично-алгоритмічних методів апаратурної реалізації. Оригінальність моделей підтверджена патентами на винахід та науковими публікаціями.*

*Ключові слова:* перетворювач, сопроцесори, табличний метод, алгоритмічний метод, апаратурна реалізація.

V.A. LUKASHENKO, A.G. LUKASHENKO  
E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv  
V.M. SPIVAK

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

## SYSTEMATIZATION OF METHODS, MODELS OF COPROCESSORS FOR HIGH-SPEED, PRECISION MICROPROCESSOR PROBLEM - ORIENTED SYSTEMS

*Abstract - In this work are proposed systematization of hardware-oriented methods and technical principles of building models of components of microprocessor systems for problem-oriented equipment. Typical feature of these models are the opportunity to provide the requirements of operation implementation simultaneously with high speed, precision, high reliability and low cost of calculators, functional converters and converters of functional codes, due to their construction, based on the summation of methods, features and means of table-algorithmic methods of hardware implementation. The originality of the model is confirmed by patent for invention and scientific publications.*

*System analysis of the known methods and hardware implementation elementary basic functions, compared with the basic table-algorithmic methods of realization the operations of reproducing functional dependencies, shows preference table-algorithmic method compared to the classical tabular method - by reducing the amount of memory.*

*Keywords:* converter, coprocessor, tabular method, algorithmic method, hardware implementation

### Вступ. Актуальність теми

Постійно зростаюча складність задач, які розв'язуються проблемно-орієнтованими системами керування, тісно пов'язана з проблемою підвищення ефективності роботи сучасних засобів обчислювальної техніки (ЗОТ).

Досягнення максимальної ефективності техніки при рішенні даної задачі, за словами академіка В.М. Глушкова, у значній степені визначається оптимальним співвідношенням програмних та апаратурних засобів системи математичного забезпечення. Удосконалювання технології виробництва мікроелектроніки привело до різкої диспропорції між вартістю програмних (software) і апаратурних (hardware) засобів системи математичного забезпечення (МЗ). Процес перекладання частини функцій МЗ з програмних засобів на апаратурні розвив тенденцію побудови багатопроцесорних систем.

Функціонально орієнтовані сопроцесори відносяться до основних засобів нелінійної обробки аналогової, цифрової інформації, і виступають у ролі периферійних процесорів.

Побудові високопродуктивних функціонально-орієнтованих сопроцесорів присвячений ряд робіт А.Д. Азарова, В.Д. Байкова, А.Н. Лебедева, А.М. Оранського, Д.Е. Пузанкова, К.Г. Самофалова, Ю.А. Скрипника, В.Б. Смолова, В.П. Тарасенка та ін. Проте в даний час цей компонент при експлуатації у розширеному діапазоні температур не має необхідних техніко-економічних характеристик водночас: прецизійності, високих інформаційно-енергетичних і масогабаритних показників, надійності та низької вартості. Організація мікро-, наноструктур функціонально-орієнтованих формувачів з великим числом кубітів порушує питання про живучість таких структур через сильні електричні поля, високу щільність струму й інших факторів, що сприяють їхній деградації через складність мінімізації поверхневих станів, що приводить до низького відсотка виходу придатних кристалів із пластини і високої вартості пристроїв. Проектування багатокритеріальних виробів електроніки на єдиному методологічному й інформаційному базисі є першочерговою задачею.

### Постановка задачі

Метою роботи є класифікація методів, технічних принципів побудови моделей, які сприяють отриманню інформації, що забезпечує прискорення процедури проектування завдяки системного аналізу моделей компонентів мікропроцесорних систем для проблемно-орієнтованої апаратури.



### Результати досліджень

Результатами дослідження є моделі сопроцесорів, що виконують функції обчислювачів, функціональних перетворювачів та перетворювачів кодів. Вони мають можливість забезпечити вимоги виконання операцій одночасно з високою швидкістю, прецизійністю, високою надійністю та низькою вартістю завдяки побудові їх на єдиному кристалі таблично-алгоритмічними методами [1, 18]. Ці методи основані на сукупності прийомів, ознак та засобів їх реалізації.

Основою таблично-алгоритмічних моделей є таблиця, яка використовується для перетворення вхідної незалежної кодової послідовності у вихідний код за допомогою відповідного типу операції. До таких операцій відносяться арифметичні (додавання / віднімання, множення/ділення, зведення до квадрату, добування кореня), логічні, що основані на функціях алгебри логіки, функціях алгебри Жегалкіна [2, 4–9]. Характеристики цих операцій впливають на швидкість моделей сопроцесорів. Наприклад, швидкість виконання арифметичних операцій залежать від кількості  $n$  розрядності операндів (множення пропорційне  $\approx n^2$ ; арифметичне додавання  $\approx n$ ), але логічна операція XOR (додавання за  $\text{mod} 2$ ) не залежить від  $n$ . Ця операція має важливу властивість – наявність оберненого елемента, що дозволяє розв’язувати рівняння шляхом додавання до обох частин однакових елементів.

Операція XOR широко використовується при кодових перетвореннях (коди Грея в двійковий та навпаки, двійковий код в однополярний код Баркера, системи впорядкування по Уолшу), при відтворенні функціональних залежностей (елементарних базових функцій, трансцендентних чисел, складних функцій) [10–13].

Крім того, таблиці формуються різноразмірними методами стиску: за рахунок кусково-лінійної апроксимації, методом трансформації аргументу, методом кортежу [14–17]. Модель таблично-логічного перетворювача кодів (ТЛПК) з кортежним методом апаратурної реалізації представлена на рис. 1. ТЛПК має розширені функціональні можливості, а саме:

- робота в режимі перетворювача коду Грея в двійковий код;
- робота в режимі перетворювача двійкового коду к код Грея;
- робота в режимі перетворювача однополярного коду Баркера в двійковий код.

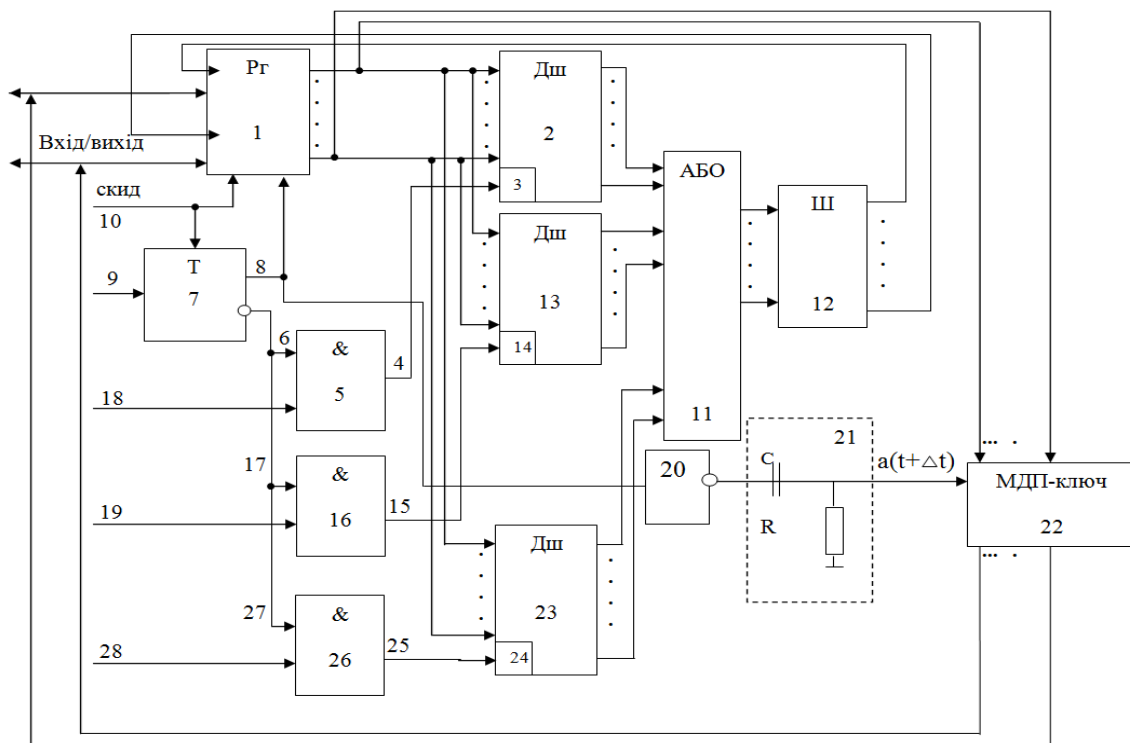


Рис. 1. Модель таблично-логічного перетворювача кодів

Позитивність методу кортежу полягає у високій швидкості відтворення значення функції завдяки, порозрядному паралельному перетворенню операндів, а негативність – у відсутності динаміки росту ефекту стиску обсягу таблиць, значення якого в загальному випадку можна прийняти рівним 2, тому що за високих інформаційних технологій  $n \gg 8$  імовірність появи одиниць і нулів дорівнює 0,5.

З огляду на те, що образною моделлю для порівняння обрана модель класичного табличного методу перетворення, як самого швидкодійного, у якій визначальним параметром апаратурної реалізації є обсяг пам'яті запам'ятовуючого пристрою ПЗУ, що обчислюється за формулою

$$V = n(2^n - 1),$$

де  $n$  – розрядність оброблюваних операндів, то вдосконалення цієї моделі приводить до моделей, у яких скорочення обсягу ПЗУ здійснюється за рахунок незначного зниження швидкодії.

Заслугує увагу дослідження динаміки росту ефекту стиску обсягу таблиць при методі трансформації коду аргументу по цілих ступенях двійкової системи числення для високих інформаційних технологій відтворення функціональних залежностей [3].

Нехай області завдання функцій і області значень відповідних елементарних функцій адекватні при їхній апаратній реалізації класичним табличним методом і методом трансформації коду аргументу, тоді ефект стиску обсягу таблиць від збільшення точності відтворення функції можна оцінити як відношення обсягів постійних запам'ятовуючих пристроїв (ПЗП) і представити формулою

$$K_c = V_{\text{кл}} / V_{\text{тр}},$$

де  $K_c$  – коефіцієнт ефекту стиску обсягу таблиць;

$V_{\text{кл}}$  – обсяг таблиць для класичного табличного методу апаратної реалізації;

$V_{\text{тр}}$  – обсяг таблиць для методу трансформації коду аргументу.

Результати, проведених аналітичних досліджень для базового набору відтворення елементарних функцій  $e^X$ ,  $\sin X$ ,  $\text{tg} X$ ,  $\text{arctg} X$ ,  $\ln X$ , представлені на рис. 2, де зображені залежності коефіцієнтів  $K_c$  від зміни похибки  $\delta$  обчислень значень відповідних функцій.

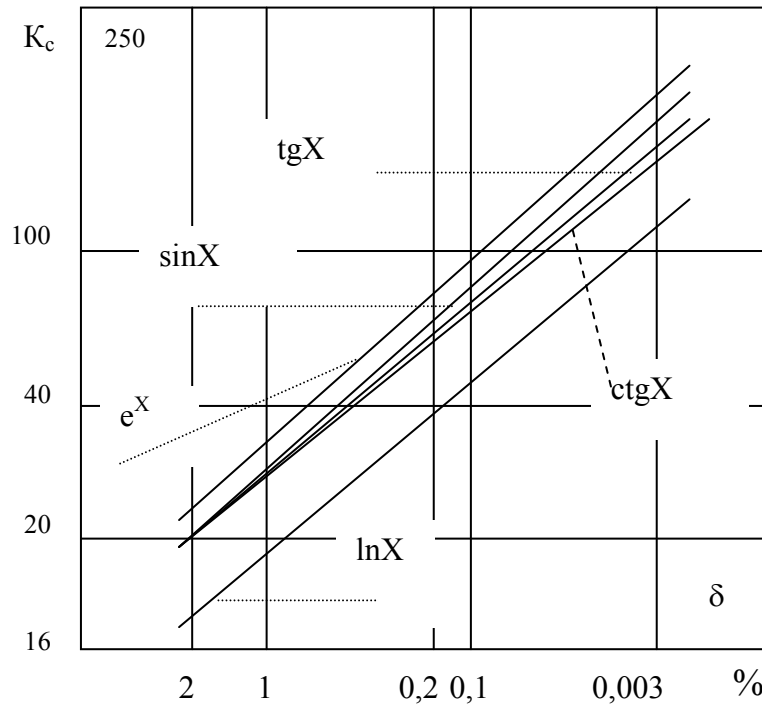


Рис. 2. Залежність  $K_c$ -ефекта стиснення таблиць від похибки  $\delta$  обчислення елементарних функцій

Аналіз графічного зображення показує високу швидкість росту  $K_c$  ефективності скорочення обсягу таблиць при прецизійних інформаційних технологіях перетворення базового набору відтворення значень функцій, за рахунок трансформації масиву кодової послідовності вхідної незалежної змінної по цілих ступенях двійки. При вивченні найбільш поширених апаратно-орієнтованих прецизійних методів і технічних принципів побудови, засобів реалізації високошвидкісних операційних обчислювачів та перетворювачів кодів, як правило, систематизують істотні ознаки, які покладені в основу їх класифікації.

Для створення такої класифікації є доцільним покласти запропонований системний аналіз наступних існуючих апаратно-орієнтованих прецизійних методів, технічних принципів побудови і моделей функціональних залежностей високошвидкісних операційних обчислювачів та перетворювачів, а саме: табличний класичний метод; таблично-алгоритмічний метод; метод скорочення апаратних затрат, оснований на властивості функціонально-орієнтованих залежностей; метод скорочення об'єму табличних даних за рахунок розбиття діапазону аргументу на підінтервали різної довжини; таблично-адитивний метод реалізації відтворення функціонально орієнтованих залежностей; таблично-логічний метод реалізації функціонально орієнтованих сопроцесорів; моделі кусково-лінійної апроксимації; моделі кусково-ступінчастої апроксимації з рівномірним квантуванням функціональної залежності; багатифункціональне перетворювання функціональних залежностей та перетворювання кодів. Одна з розроблених класифікаційних схем для таблично-алгоритмічних функціонально орієнтованих формувачів та перетворювачів кодів представлена на рис. 3.

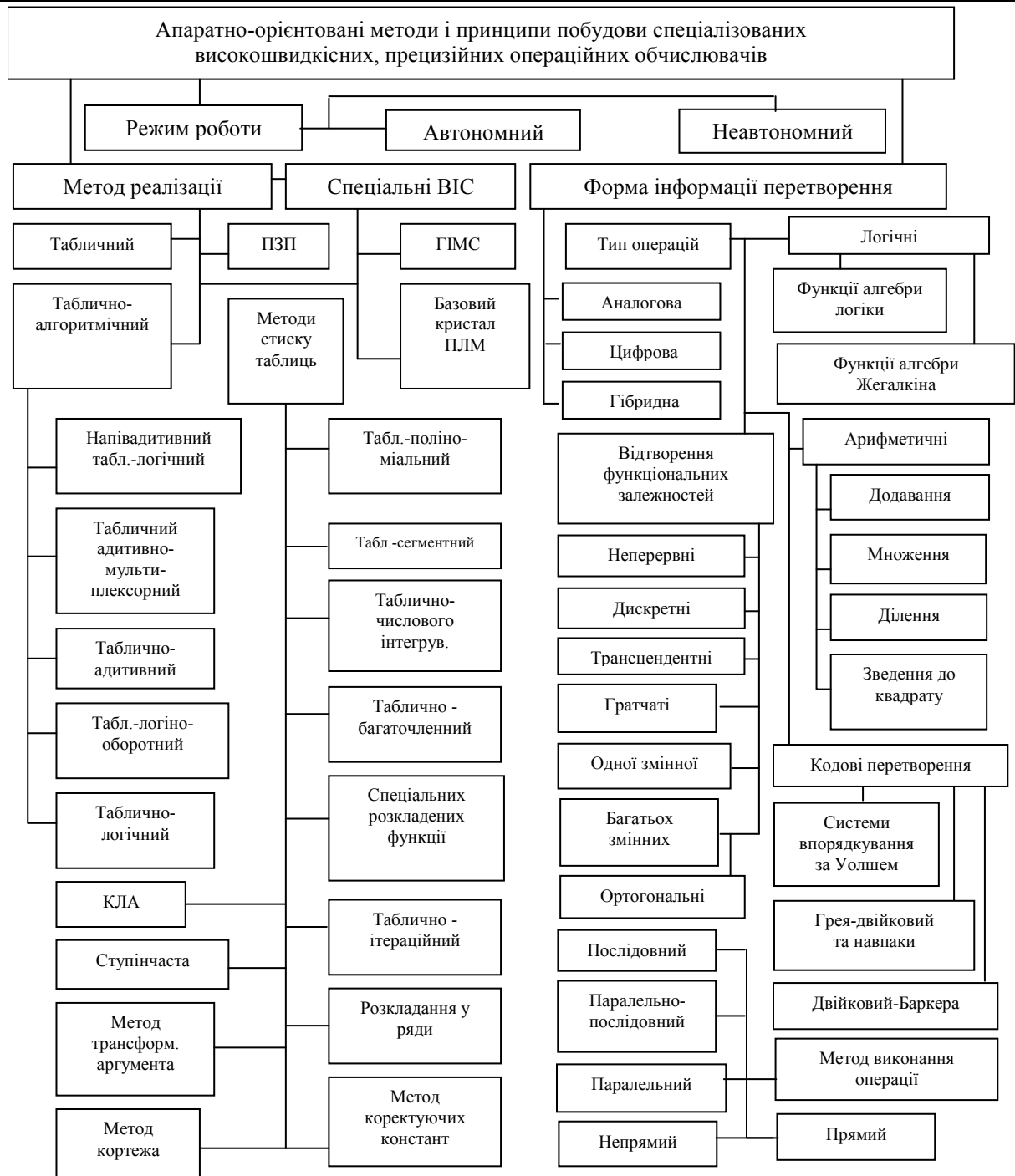


Рис. 3. Класифікаційна схема методів і технічних принципів побудови функціонально-орієнтованих сопроцесорів

Модель класифікації є основою для вивчення та удосконалення властивостей таблично-алгоритмічних методів і принципів рішення задач обчислювального характеру функціонально орієнтованими процесорами та розробки відповідної моделі і проведення порівняльного аналізу.

Таким чином, проведена систематизація, аналіз можливостей апаратної реалізації таблично-алгоритмічних функціонально-орієнтованих процесорів і теоретичні дослідження параметрів та їх властивостей, дозволили встановити, що реалізація прецизійних інформаційних технологій таблично-алгоритмічними методами є ефективною і перспективною. Оригінальність моделей підтверджується патентами на винахід [2–17].

### Висновки

Запропонована класифікаційна схема, що включає характеристики сучасних формувачів інформації, отриманих на базі системного аналізу відомих методів і технічних засобів реалізації елементарних базових функцій з використанням найбільш поширених апаратно-орієнтованих прецизійних методів, принципів побудови і моделі високошвидкісних операційних обчислювачів.

Також системний аналіз відомих методів і технічних засобів реалізації елементарних базових

функцій в порівнянні з основними таблично-алгоритмічними методами виконання операцій відтворення функціональних залежностей, які займають в процесі розв'язання конкретних задач спеціалізованих обчислювачів 40–60%, показує перевагу таблично-алгоритмічного методу в порівнянні з класичним табличним у скороченні об'єму пам'яті.

В подальшому досліджені доцільно звернути увагу на формування багатофункціональних сопроцесорів при апаратурній реалізації на єдиному кристалі за допомогою напівадитивного таблично-логічного методу

### Література

1. Лукашенко В.М. О перспективности таблично-алгоритмических методов при реализации высоких информационных технологий / В.М. Лукашенко // Вісник ЧПІ. – 2000. – № 4. – С. 18 – 22.
2. Пат. 35014 А Україна, МПК G06G07/26. Цифровий пристрій для обчислення функцій / В.М. Лукашенко, С.В. Ротте, М.І. Гладченко, А.Г. Лукашенко. – № 99074386 ; заявл. 29.07.1999 ; опубл. 15.03.2001 ; Бюл. № 2. – 3 с.
3. Пат. 40177 Україна, МПК G06F7/544. Цифровий пристрій для обчислення функцій / Лукашенко В.М., Кулігін О.А., Лукашенко А.Г., Рудаков К.С., Лукашенко В.А., Зубко І.А. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u200813017 ; заявл. 10.11.2008 ; опубл. 25.03.2009 ; Бюл. № 6.
4. Пат. 40745 Україна, МПК G06G7/00. Цифровий пристрій для обчислення функцій / Лукашенко В.М., Дахно С.В., Лукашенко А.Г., Рудаков К.С., Лукашенко В.А. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u200813059 ; заявл. 10.11.2008 ; опубл. 27.04.2009 ; Бюл. № 8. – 4 с.
5. Пат. 47009 Україна, МПК G06F 7/548(2009.01) G06F 1/02. Пристрій для обчислення елементарних функцій / Лукашенко А.Г. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u 200908272 ; заявл. 05.08.2009 ; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 5с.
6. Пат. 47901 Україна, МПК G06F 7/52. Пристрій для множення N-розрядних чисел / Лукашенко А.Г. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u 200909902 ; заявл. 28.09.2009 ; опубл. 25.02.2010, Бюл. 4.
7. Пат. 53450 Україна, МПК G06G 7/00 G06G 7/00. Цифровий пристрій для обчислення прямих та обернених функцій / Лукашенко А.Г., Лукашенко Д.А., Лукашенко В.А., Лукашенко В.М. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u 201003337 ; заявл. 22.03.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.
8. Пат. 10485 Україна, МПК G06G07/26; G06J3/00. Гібридний обчислювальний пристрій / В.М. Лукашенко (UA), Ю.Г. Лега (UA), А.Г. Лукашенко (UA), М.Г. Лукашенко (UA), Я.В. Корпань (UA), С.К. Романовський (UA), М.А. Караван (UA), Д.А. Лукашенко (UA) ; ЧДТУ – № u200504233 ; заявл. 04.05.2005 ; опубл. 15.11.2005 ; Бюл. № 11.
9. Пат. 33624 Україна, МПК G06G07/00; G06J3/00. Гібридний обчислювальний пристрій / В.М. Лукашенко (UA), А.Г. Лукашенко (UA), Я.В. Корпань (UA), М.А. Караван (UA), Д.А. Лукашенко (UA), К.С. Рудаков (UA), В.А. Лукашенко (UA) ; ЧДТУ – № a200711691 ; заявл. 22.10.2007 ; опубл. 10.07.2008 ; Бюл. № 13.
10. Пат. 5476, Україна, МПК G06F5/00. Перетворювач двійкових кодів в двійково-десятковий код / В.М. Лукашенко (UA), Ю.П. Кунченко (UA), Я.В. Корпань (UA), М.Г. Лукашенко (UA), Д.А. Лукашенко (UA) ; ЧДТУ – № 20040604861 ; заявл. 21.06.2004 ; опубл. 15.03.2005 ; Бюл. № 3.
11. Пат. 40178, Україна, МПК G 06 F 5/00. Перетворювач коду Грея в двійковий код і навпаки / Лукашенко В.М., Лукашенко А.Г., Рудаков К.С., Лукашенко В.А., Юпин Р.Є. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – №u200813020; заявл. 10.11.08; опубл. 25.03.09, Бюл. №6.– 4с.
12. Пат. 44833 Україна, МПК G 06 F 5/02. Перетворювач двійкового коду в однополярні оборотні коди / Лукашенко В.М., Корпань Я.В., Лукашенко А.Г., Рудаков К.С., Лукашенко Д.А., Юпин Р.Є., Чичужко М.В. ; заявник Черкаський державний технологічний університет. – № u200906159 ; заявл. 15.06.2009 ; опубл. 12.10.2009, Бюл. 19. – 5 с.
13. Пат. 72952 Україна, МПК (2012.01) G 06 F 5/00. Перетворювач двійкового коду в однополярні оборотні коди / А.Г. Лукашенко, В.М. Лукашенко, К.С. Рудаков, Д.А. Лукашенко, О.С. Вербицький, С.А. Міценко, В.А. Лукашенко ; заявник та власник Черкаський державний технологічний університет – № u2011 13847 ; заявл. 24.11.2011 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17. – 5 с.
14. Пат. 89784 U Україна, МПК (2014.01) G 06F 5/00. Таблично-логічний перетворювач кодів / В.М. Лукашенко, І.А. Зубко, А.Г. Лукашенко, В.А. Лукашенко, М.В. Чичужко, Д.А. Лукашенко ; заявник та власник В.М. Лукашенко. – № u 2013 15042 ; заявл. 23.12.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
15. Пат. 77797 Україна, МПК G 06G 7/26 (2006.01). Кусково-лінійний апроксиматор / А.Г. Лукашенко, Д.А. Лукашенко, І.А. Зубко, В.А. Лукашенко, В.М. Лукашенко, Т.Ю. Уткіна ; заявник та власник Черкас. держ. технол. ун-т. – № u 201210335 ; заявл. 31.08.2012 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 6 с.
16. Пат. 80851 Україна, МПК G 06G 7/26 (2006.01). Формувач складних кусково-лінійних функцій / А.Г. Лукашенко, Д.А. Лукашенко, І.А. Зубко, В.А. Лукашенко, В.М. Лукашенко ; заявник та власник

Черкаський державний технологічний університет. – № у 2012 15113 ; заявл. 28.12.2012 ; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

17. Пат. 88085 Україна, МПК (2006.01) G 06G 7/26. Формувач складних кусково-лінійних функцій / А.Г. Лукашенко, Д.А. Лукашенко, І.А. Зубко, В.А. Лукашенко, В.М. Лукашенко ; заявник та власник В.М. Лукашенко. – № у 2013 12598 ; заявл. 28.10.2013 ; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. – 4 с.

18. Лукашенко В.М. Метод розширення функціональних можливостей сучасних мікроконтролерів / В.М. Лукашенко, М.В. Чичужко, Д.А. Лукашенко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки – Хмельницький : ХНУ, 2013. – № 6. – С. 186–189.

#### References

1. Lukashenko V. M. O perspektivnosti tablychno-alhorytmicheskyykh metodov pry realizatsyy vysokyykh ynformatsyonnykh tekhnolohiyi / V. M. Lukashenko // Visnyk ChITI. – 2000. №4. С. 18 – 22.
2. Digital device for calculating the functions:Pat. Ukraine 35014,MPKG06G07/26./ V.M. Lukashenko,C. V. Rotte, A.H. Lukashenko, M.I. Gladchenko, A.G. Lukashenko; applicant - Cherkassy state technological university. - №99074386; stat. 29.07.1999; publ.15.03.2001;Bull. №2. – p.3.
3. Digital device for calculating the functions: Pat. Ukraine 40177, MPK G06F7/544/ V.M. Lukashenko, O.A. Kulygin, A.G. Lukashenko, K.S. Rudakov, V.A. Lukashenko, I.A. Zubko; applicant - Cherkassy state technological university. - №u200813017; stat. 10.11.2008; publ. 25.03.2009; Bull.. №6. – p.4.
4. Digital device for calculating the functions:Pat. Ukraine 40745, MPK G06G7/00/ V.M. Lukashenko, A.G. Lukashenko, K.S. Rudakov, V.A. Lukashenko, S.M. Dahno; applicant - Cherkassy state technological university. - №u200813059;stat.10.11.2008;publ. 27.04.2009; Bull. №8.p.4.
5. Digital device for calculating the elementary functions: Pat. Ukraine 47009, MPK G06F 7/548(2009.01) G06F 1/02/ A.G. Lukashenko; applicant - Cherkassy state technological university. - №u200908272; stat. 05.08.2009; publ. 11.01.2010; Bull. №1.–p.5.
6. Device formultiplication of N-bitnumbers: Pat. Ukraine 47901, MPK G06F 7/52/ A.G. Lukashenko; applicant - Cherkassy state technological university. - №u200909902; stat. 28.09.2009; publ. 25.02.2010; Bull. №4.
7. Digital device for calculatingthe direct and inverse functions: Pat. Ukraine 53450, MPKG06G 7/00 G06G 7/00 / Lukashenko A.G., Lukashenko D.A., Lukashenko V.A., Lukashenko V.M.; applicant - Cherkassy state technological university. - №u201003337; stat. 22.03.2010; publ. 11.10.2010; Bull.. №19.
8. Hybrid computing device: Pat. Ukraine 10485, G06G07/26; G06J3/00/ V.M. Lukashenko, U.G. Lega, A.G. Lukashenko, M.G. Lukashenko, Y.V. Korpan, S.K. Romanovsky, M.A. Karavan, D.A. Lukashenko; applicant – Cherkassy state technological university. - №u200504233; stat. 04.05.2005; publ. 15.11.2005; Bull. №11.
9. Hybrid computing device: Pat. Ukraine33624, MPKG06G07/00; G06J3/00/ V.M. Lukashenko, A.G. Lukashenko, Y.V. Korpan, M.A. Karavan, D.A. Lukashenko, K.S. Rudakov, V.A. Lukashenko.; applicant- Cherkassy state technological university. - №a200711691; stat. 22.10.2007; publ. 10.07.2008; Bull. №13.
10. Converter from binary code to binary-coded decimal: Pat. Ukraine 5476, MPK G06F5/00/ V.M. Lukashenko,Y.P. Kunchenko, Y.V. Korpan, M.G. Lukashenko, D.A. Lukashenko; applicant - Cherkassy state technological university. - №20040604861; stat. 21.06.2004; publ. 15.03.2005; Bull. №3.
11. Transformer Gray code to binary code and vice versa: Pat. Ukraine 40178, MPK G 06 F 5/00. / V.M. Lukashenko, A.G. Lukashenko, V.A. Lukashenko, K.S. Rudakov and other.; applicant - Cherkassy state technological universit - №u200813020; stat. 10.11.08; publ. 25.03.09, Bull.. №6. – p.4.
12. Converter from binary code to the unipolar ones' complement code: Pat. Ukraine 44833, MPK G 06 F 5/02 / Lukashenko V.M., Korpan Y.V., Lukashenko A.G., Rudakov K.S., Lukashenko D.A., Yupyn R.Ye, Chychuzhko M.V.; applicant - Cherkassy state technological university. - №u200906159; stat. 15.06.2009; publ. 12.10.2009; Bull. №19. –p.5.
13. Converter from binary code to the unipolar ones' complement code: Pat. Ukraine 72952, MPK (2012.01)G 06 F 5/00 / A.G. Lukashenko, V.M. Lukashenko, K.S. Rudakov, D.A. Lukashenko, O.S. Verbitsky, S.A. Mitsenko, V.A. Lukashenko; applicant and owner - Cherkassy state technological university. - № u201113847; stat. 24.11.2011; publ. 10.09.2012; Bull. №17.- p.5.
14. Table-logicalconvertercodes: Pat. 89784 Ukraine, MPK (2014.01) G 06F 5/00. / V.M. Lukashenko, I.A. Zubko, A.G. Lukashenko, V.A. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, D.A. Lukashenko; applicant and owner - V.M. Lukashenko. - № u 2013 15042; stat. 23.12.2013; publ. 25.04.2014, Bull. № 8. – p.5.
15. Piecewise linear approximator: Pat. Ukraine 77797, MPK G 06G 7/26 (2006.01) / A.G. Lukashenko, D.A. Lukashenko, I.A. Zubko, V.A. Lukashenko, V.M. Lukashenko, T.U. Utkina; applicant and owner - Cherkassy state technological university. - №u 201210335; stat. 31.08.2012; publ. 25.02.2013; Bull. №4. –p.6.
16. Generator of complex piecewise linear functions: Pat. Ukraine 80851, MPK G 06G 7/26 (2006.01) / A.G. Lukashenko, D.A. Lukashenko, I.A. Zubko, V.A. Lukashenko, V.M. Lukashenko; applicant and owner - Cherkassy state technological university. - №u 2012 15113; stat. 28.12.2012; publ. 10.06.2013; Bull. №11.
17. Generator of complex piecewise linear functions: Pat. Ukraine 88085, MPK (2006.01)G 06G 7/26 / A.G. Lukashenko, D.A. Lukashenko, I.A. Zubko, V.A. Lukashenko, V.M. Lukashenko; applicant and owner - V.M. Lukashenko. - №u 2013 12598; stat. 28.10.2013; publ. 25.02.2014; Bull. №4.-p. 4.
18. Lukashenko V.M. Metod rozshyrennia funktsionalnykh mozhlyvostey suchasnykh mikrokontroleriv / V.M. Lukashenko, M.V. Chichuzhko, D.A. Lukashenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical science. Khmelnytsky. 2013. Issue 6. – pp. 186–189.

Рецензія/Peer review : 19.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., Кришталь М.А.

УДК 519.7

М.М. КАСЯНЧУК, І.З. ЯКИМЕНКО, І.Р. ПАЗДРІЙ, Я.М. НИКОЛАЙЧУК  
Тернопільський національний економічний університет

## АНАЛІТИЧНИЙ ПОШУК МОДУЛІВ ДОСКОНАЛОЇ ФОРМИ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В КИТАЙСЬКІЙ ТЕОРЕМІ ПРО ЗАЛИШКИ

*У даній роботі показано, що система залишкових класів є досить перспективною для застосування в сучасних обчислювальних системах, особливо під час виконання операцій над багаторозрядними числами. Отримано аналітичні вирази та визначено умови, які дозволяють обчислити усі варіанти систем модулів для заданої їх кількості у досконалій формі системи залишкових класів. В результаті проведених досліджень показано, що запропонований метод істотно зменшує обчислювальну складність китайської теореми про залишки за рахунок уникнення операції пошуку оберненого елемента за модулем.*

*Ключові слова: система залишкових класів, досконала форма, набір модулів, факторизація, китайська теорема про залишки.*

M.M. KASIANCHUK, I.Z. YAKYMENKO, I.R. PAZDRIY, YA.M. NYKOLAYCHUK  
Ternopil National Economic University

### SEARCH MODULES ANALYSIS OF RESIDUAL PERFECT FORM CLASS AND THEIR APPLICATION IN THE CHINESE REMAINDER THEOREM

*Abstract – This paper shows that the system of residual classes is quite promising for use in modern computing systems, especially when performing operations on multi-digit numbers. It is one from alternatives to binary system which allows to use the new approaches for computing managing under performing of basic mathematical operations. To optimize of computations and them parallelization the use of perfect form of residual classes system are appropriated.*

*The analytical expressions and the conditions that allow to calculate all versions of modules for a given number of them in perfect form system of residual classes. The particular cases are considered and specific characters of changes of the respective modules values are studied. It is shown that the proposed method significantly reduces the computational complexity of Chinese remainder theorem by the avoiding of operation of finding of inverse element by module. Our results allow us to use them effectively in asymmetric systems of information security and computer networks for data transmission by open channels.*

*Keywords: system of residual classes, perfect form, a set of modules, factorization, the Chinese Remainder Theorem.*

#### Вступ

На даний час система залишкових класів (СЗК) або теоретико-числовий базис (ТЧБ) Крестенсона [1], який її породжує, є однією з альтернатив двійковій системі числення (або ТЧБ Радемахера), що дозволяє застосовувати нові підходи до організації обчислювальних систем при виконанні елементарних математичних операцій [2].

Хоча СЗК не позбавлена недоліків, до яких відносяться, зокрема, відсутність ділення та порівняння чисел, необхідність визначення умов переповнення розрядної сітки, однак її успішно можна застосовувати для додавання, віднімання та множення цілих чисел [3]. Це стосується матрично-векторних розрахунків [4], множення та піднесення до степеня великорозрядних чисел [5] тощо. Особливо корисним може бути застосування СЗК в задачах сучасної криптографії (алгоритми RSA, Ель-Гамала [6], електронного цифрового підпису тощо) та кодування даних [7, 8]. Безсумнівною перевагою СЗК є також можливість виконання операцій над числами, які менші за вибрані модулі, розпаралелення процесу обчислень та відсутність мікрозрядних переносів.

СЗК – це непозиційна система числення [3], десяткові числа  $N$  в якій представляються невід’ємними залишками  $b_i$  від ділення на кожен з системи взаємно простих модулів  $p_i$ . Операції додавання, віднімання і множення в СЗК відбуваються незалежно по кожному модулю без переносів між розрядами. Діапазон обчислень обмежується виразом  $0 \leq N \leq \prod_{i=1}^n p_i - 1$ .

Зворотне перетворення з СЗК у десяткову систему числення ґрунтується на використанні китайської теореми про залишки [9] і є досить громіздким процесом, що являється ще одним недоліком СЗК, який стримував її розвиток і поширення:

$$N = \left( \sum_{i=1}^n b_i B_i \right) \bmod P \quad (1)$$

де  $P = \prod_{i=1}^n p_i$ ,  $B_i = M_i m_i$ ,  $M_i = \frac{P}{p_i}$ ,  $m_i$  шукається з виразу  $(M_i m_i) \bmod p_i = 1$  і  $\left( \sum_{i=1}^n B_i \right) \bmod P = 1$ .

На даний час пошук оберненого елемента  $m_i = M_i^{-1} \bmod p_i$  здійснюється такими способами: 1) брутальною атакою; 2) за допомогою функції Ейлера; 3) використовуючи наслідок алгоритму Евкліда [10].

Всі вони є досить громіздкими і характеризуються значною обчислювальною та часовою складністю при виконанні великої кількості ділень з остачею, піднесення до степеня та знаходження функції

Ейлера. Крім того, ці операції повинні виконуватися над багаторозрядними числами, що може привести до переповнення розрядної сітки.

У роботі [1] описана досконала форма СЗК (ДФ СЗК), у якій підбір модулів такий, що

$$M_i \bmod p_i = 1, \quad (2)$$

тобто  $m_i=1$ . В [11], [12] розвинуто дану теорію, однак не вказано методу побудови всіх можливих варіантів у наборів модулів ДФ СЗК при заданій їх кількості.

Мета роботи. Виходячи з вищесказаного, метою нашої роботи є подальший розвиток теорії ДФ СЗК та визначення умов, які дозволяють побудувати всі можливі варіанти для заданої кількості модулів ДФ СЗК.

Розробка алгоритмів підбору модулів ДФ СЗК

Запишемо вираз (2) у вигляді системи:

$$\begin{cases} M_1 \bmod p_1 = 1 \\ \dots \\ M_n \bmod p_n = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Домноживши кожне рівняння на відповідний модуль, отримаємо:

$$\begin{cases} P \bmod p_1^2 = p_1 \\ \dots \\ P \bmod p_n^2 = p_n. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язуючи (4) стандартними методами теорії чисел згідно китайської теореми про залишки, матимемо:

$$P = \left( \sum_{i=1}^n p_i M_i^2 m_i^2 \right) \bmod M \quad (5)$$

де 
$$M = \prod_{i=1}^n p_i^2 = P^2$$

Враховавши, що у ДФ СЗК  $m_i=1$ , та скоротивши модуль, ліву та праву частину (5) на їх спільний дільник  $P = \prod_{i=1}^n p_i$ , запишемо (5) таким чином:

$$\left( \sum_{i=1}^n M_i \right) \bmod P = 1 \quad (6)$$

Вираз (6) еквівалентний рівності:

$$\sum_{i=1}^n M_i = kP + 1 \quad (7)$$

де  $k=1, 2, 3, \dots$

Поділивши ліву та праву частини (7) на  $P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$ , отримаємо остаточний вираз для пошуку набору модулів у ДФ СЗК:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = k + \frac{1}{\prod_{i=1}^n p_i} \quad (8)$$

Елементарною підстановкою можна переконатися, що єдиною можливою системою з трьох модулів ДФ СЗК є 2, 3, 5, оскільки при збільшенні будь-якого  $p_i$  ліва частина (8) стає меншою 1.

Дослідження цього рівняння для великої кількості модулів, враховуючи, що сума ряду  $\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i}$  розбіжна, тобто  $k$  може бути як завгодно великим, є досить громіздкою задачею.

Обмежимося найпростішим випадком, який відповідає значенню  $k=1$ . Крім того, слідуючи [11], виберемо кількість модулів  $n=6$ . Вираз (8) набуде такого вигляду:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} + \frac{1}{p_4} + \frac{1}{p_5} + \frac{1}{p_6} = 1 + \frac{1}{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6} \quad (9)$$

На даний час відомі тільки такі набори модулів ДФ СЗК, в яких  $p_1=2$ ,  $p_2=3$ , тоді (9) перепишемо так:

$$\sum_{i=3}^n \frac{1}{p_i} = \frac{1}{6} + \frac{1}{\prod_{i=3}^n p_i} \quad (10)$$

Модуль  $p_3$  виберемо так, щоб при відніманні  $\frac{1}{p_3}$  в правій частині (10) в чисельнику отримати 1.

Видно, що  $p_3=7$ . Тоді маємо: 
$$\sum_{i=4}^n \frac{1}{p_i} = \frac{1}{42} + \frac{1}{\prod_{i=4}^n p_i}.$$

Аналогічно звідси випливає, що  $p_4=43$ :

$$\sum_{i=5}^n \frac{1}{p_i} = \frac{1}{1806} + \frac{1}{\prod_{i=4}^n p_i} \tag{11}$$

Для останнього модуля  $p_n$  справедлива рівність:

$$\frac{1}{p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1} - 1} = \frac{1}{p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1}} + \frac{1}{p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1} (p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1} - 1)} \tag{12}$$

Звідси випливає закономірність побудови системи модулів ДФ СЗК базису Крестенсона:

$$\begin{cases} p_1 = 2 \\ p_i = p_1 p_2 \dots p_{i-1} + 1, \quad 1 < i < n \\ p_n = p_1 p_2 \dots p_{n-1} - 1. \end{cases} \tag{13}$$

Слід зазначити, що запропонований метод не вичерпує всіх можливих наборів модулів ДФ СЗК при заданих .

**Аналітичний пошук модулів ДФ СЗК**

Для вирішення даної задачі трансформуємо (9) так:

$$6p_3 p_4 (p_5 + p_6) = (p_4 (p_3 - 6) - 6p_3) p_5 p_6 + 1 \tag{14}$$

Введемо позначення:

$$p_{5,6} = \frac{6p_3 p_4 + a, b}{p_4 (p_3 - 6) - 6p_3} \tag{15}$$

Підставивши (15) в (14), матимемо умову, яка повинна виконуватися для визначення набору модулів для ДФ СЗК:

$$(6p_3 p_4)^2 - (p_4 (p_3 - 6) - 6p_3) = ab \tag{16}$$

Це означає, що ліва частина (16) повинна бути факторизована, на основі чого визначаються параметри  $a$  та  $b$  . Крім того, як випливає з (15), модулі  $p_5$  та  $p_6$  мають бути цілими числами, тобто

$$(6p_3 p_4 + a, b) \bmod (p_4 (p_3 - 6) - 6p_3) = 0 \tag{17}$$

Отже, вирази (16) та (17) визначають умови знаходження будь-якого варіанту набору модулів ДФ СЗК.

**Часткові випадки**

Перевіривши можливі значення  $p_3$  , можна побачити, що даний модуль може дорівнювати 7 або 11.

Розглянемо ці випадки детальніше:

1)  $p_3=7$ . Вирази (16) та (17) відповідно трансформуються:

$$\begin{aligned} (42p_4)^2 - (p_4 - 42) &= ab \\ (42p_4 + a, b) \bmod (p_4 - 42) &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

Модуль  $p_4$  має бути не менше 43, оскільки набір 2, 3, 7, 41 утворює ДФ СЗК. Тоді друга умова (18) зникає, а з першої будемо мати:

$$ab = (42 \cdot 43)^2 - 1 = 1805 \cdot 1807 = 5 \cdot 19 \cdot 19 \cdot 13 \cdot 139 \tag{19}$$

Використавши все можливі перестановки множників у (19), можна отримати 12 можливих варіантів наборів з 6 модулів ДФ СЗК при заданих 2, 3, 7, 43, які представлені в табл. 1.

При  $p_4=47$  отримаємо:  $p_{5,6} = \frac{1974 + a, b}{5}$ ,  $ab = (42 \cdot 47)^2 - 5 = 9041 \cdot 431$  .

Можливі два варіанти, які представлені у табл. 2.

При  $p_4=53$  рівності (15) та (16) набудуть вигляду:  $p_{5,6} = \frac{2226 + a, b}{11}$ ,

$ab = (42 \cdot 53)^2 - 11 = 5 \cdot 151 \cdot 6563$ . Оскільки,  $2226 \bmod 11 = 4$ ,  $5 \bmod 11 = 5$ ,  $151 \bmod 11 = 8$ ,  $6563 \bmod 11 = 7$ , то



умову (17) задовольняє тільки значення  $a=5 \cdot 151$ . Відповідно  $b=6563$  і  $p_5=271$ ,  $p_6=799$ .

Аналогічно можна знайти ще тільки один набір модулів:  $p_4=71$ ,  $p_5=103$ ,  $p_6=61429$ .

1)  $p_3=11$ . Вирази (16) та (17) набудуть вигляду:

$$(66p_4)^2 - (5p_4 - 66) = ab; (66p_4 + a, b) \bmod (5p_4 - 66) = 0 \quad (20)$$

Умову (20) задовольняють значення  $p_4=23$ ,  $p_5=31$ ,  $p_6=47057$ .

Таблиця 1

#### Можливі варіанти наборів з 6 модулів ДФ СЗК при заданих 2, 3, 7, 43

№	$a$	$b$	$p_5$	$p_6$
1	1	5·19·19·13·139	1807	3263441
2	5	19·19·13·139	1811	654133
3	13	5·19·19·139	1819	252701
4	19	5·19·13·139	1825	173471
5	5·13	19·19·139	1871	51985
6	5·19	19·13·139	1901	36139
7	139	5·19·19·13	1945	25271
8	19·13	5·19·139	2053	15011
9	19·19	5·13·139	2167	10841
10	5·139	19·19·13	2501	6499
11	5·13·19	19·139	3041	4447
12	5·19·19	13·139	3611	3613

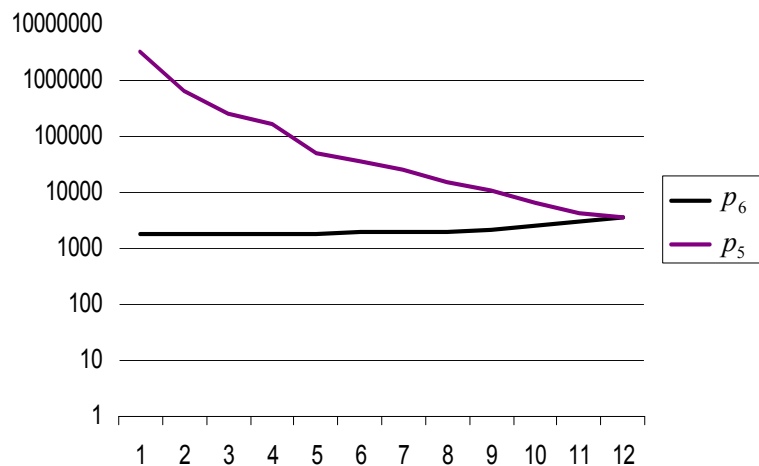
Таблиця 2

#### Можливі варіанти наборів з 6 модулів ДФ СЗК при заданих 2, 3, 7, 47

№	$a$	$b$	$p_5$	$p_6$
1	1	9041·431	395	779729
2	431	9041	481	2203

Отже, значення елементів таблиці, отримані в [11] методом підбору, обчислені за допомогою аналітичних розрахунків.

На рисунку 1 представлений характер зміни значень модулів  $p_5$  та  $p_6$  залежно від номера модуля, згідно з таблицею 1 у логарифмічній шкалі.

Рис. 1. Характер зміни значень модулів  $p_5$  та  $p_6$  залежно від номера модуля

Як видно з рисунка, модуль  $p_5$  зростає повільно. В той же час, графік для  $p_6$  істотно спадає із збільшенням номера модуля.

#### Застосування досконалої форми системи залишкових класів в задачах захисту інформації

ДФ СЗК може успішно використовуватися в асиметричних криптосистемах, зокрема, в криптосистемі Рабіна, яка ґрунтується на застосуванні КТЗ [9]. Вона зводиться до розв'язання такої системи конгруенцій:

$$\begin{cases} x \bmod p_1 = b_1 \\ x \bmod p_2 = b_2 \\ \dots\dots\dots \\ x \bmod p_n = b_n. \end{cases} \quad (21)$$

Розв’язок даної системи представлений в (1.8). Як уже зазначалося, пошук обернених елементів для коефіцієнтів  $m_i = M_i^{-1} \bmod p_i$  становить значну обчислювальну складність. Однак якщо модулі  $p_1, p_2, \dots, p_n$  утворюють ДФ СЗК, тоді можна уникнути цієї громіздкої операції.

Нехай  $p_1=2, p_2=3, p_3=7, p_4=43, p_5=3611, p_6=3613$  і потрібно розв’язати таку систему конгруенцій:

$$\begin{cases} x \bmod 2 = 1 \\ x \bmod 3 = 2 \\ x \bmod 7 = 5 \\ x \bmod 43 = 20 \\ x \bmod 3611 = 100 \\ x \bmod 3613 = 1000. \end{cases} \quad (22)$$

В загальному випадку  $x = \left( \sum_{i=1}^6 b_i M_i m_i \right) \bmod P$ , де  $m_i = M_i^{-1} \bmod p_i$ . В ДФ СЗК  $m_i = 1$ , звідси:

$$x = (3 \cdot 7 \cdot 43 \cdot 3611 \cdot 3613 \cdot 1 + 2 \cdot 7 \cdot 43 \cdot 3611 \cdot 3613 \cdot 2 + 2 \cdot 3 \cdot 43 \cdot 3611 \cdot 3613 \cdot 5 + 2 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 3611 \cdot 3613 \cdot 20 + 2 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 43 \cdot 3613 \cdot 100 + 2 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 43 \cdot 3611 \cdot 1000) \bmod 5225745 = (11781028329 + 15708037772 + 16830040470 + 10959096120 + 652507800 + 6521466000) \bmod 23562056658 = (62452176491) \bmod 23562056658 = 15328063175.$$

Отже, шукане значення  $x$  отримане за допомогою китайської теореми про залишки без виконання громіздкої операції пошуку оберненого елемента за модулем, а використовуючи додавання та множення, методи спрощення яких описані в [4].

Оцінка та порівняльний аналіз обчислювальних складностей відомих та запропонованих алгоритмів.

При перетвореннях згідно КТЗ використовуються такі основні модульні операції: знаходження оберненого елемента; знаходження залишків; операції множення та додавання.

Тому при визначенні обчислювальних складностей відомого та запропонованого методу, які дозволяють виконувати перетворення КТЗ, потрібно враховувати складності вищезазначених операцій, наведені у табл. 3.

Таблиця 3

**Обчислювальні складності основних операцій КТЗ**

№	Основні операції	Обчислювальна складність операцій у запропонованому алгоритмі	Обчислювальна складність операцій у класичному алгоритмі
1.	Пошук оберненого елемента	відсутня	$O(17,5k \cdot ((n+1)^2 + n^2 + n))$
2.	Пошук залишків	$O(\log_2 n/2)$	$O((n+1)^2 + n)$
3.	Операція множення і додавання	$O(\log_2 k \cdot (2 \cdot \log_2^2 n + n))$	$O(k \cdot (2n^2 + n))$

де  $k$  – кількість взаємно простих модулів.

Враховуючи табличні дані, алгоритмічна складність КТЗ з використанням запропонованого методу становить  $O((\log_2 k \cdot (2 \cdot \log_2^2 n + n)) + (\log_2 n/2)) \approx O(\log_2 k \cdot (2 \cdot \log_2^2 n + n))$ , а з використанням класичного алгоритму –  $O(37k \cdot n^2 + 53,5k \cdot n + 17,5k + n^2 + 3n + 1) \approx O(37k \cdot n^2)$ .

На рис. 2 показано графіки залежності обчислювальних складностей від розрядності чисел  $n$  в логарифмічній шкалі.

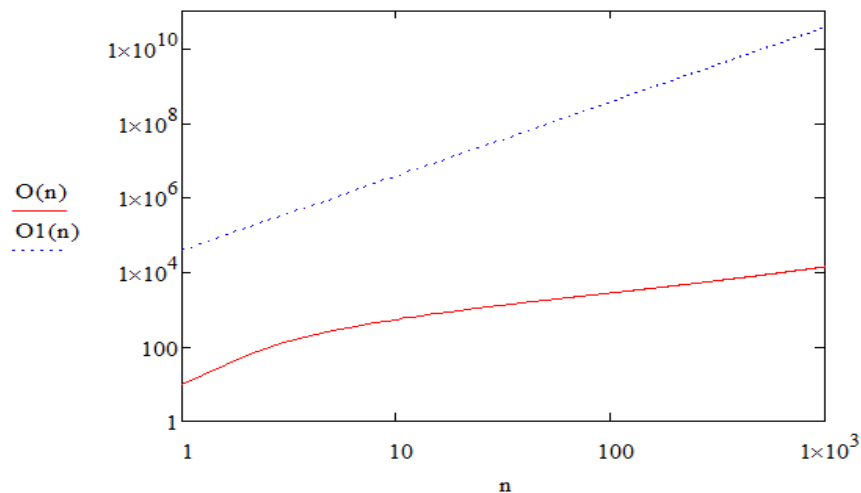


Рис. 2. Графіки залежності обчислювальних складностей від розрядності чисел  $n$  запропонованим методом  $O(n)$  та класичним  $O_1(n)$

З рисунка видно, що використання запропонованого методу, який дозволяє аналітично обчислювати модулі ДФ СЗК і уникати операції пошуку оберненого елемента за модулем істотно зменшує обчислювальну складність КТЗ відносно класичного.

#### Висновки

У роботі показано, що СЗК є досить перспективною для застосування у сучасних обчислювальних системах, особливо під час виконання операцій над багаторозрядними числами. Уперше отримано аналітичні вирази та визначено умови, які дозволяють обчислити усі варіанти систем модулів для заданої їх кількості у ДФ СЗК. Показано, що використання запропонованого методу, який дозволяє аналітично обчислювати модулі ДФ СЗК і уникати операції пошуку оберненого елемента за модулем істотно зменшує обчислювальну складність КТЗ відносно класичного.

#### Література

1. Николайчук Я.М. Теория джерел інформації / Я.М. Николайчук. – Тернопіль : ТзОВ „Тернограф”, 2010. – 536 с.
2. Николайчук Я.М. Теоретичні основи побудови та структура спец процесорів в базисі Крестенсона / Я.М. Николайчук, О.І. Волинський, С.В. Кулина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 3. Т.1. – С. 85–90.
3. Акушкин И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушкин, Д.И. Юдицкий. – М. : Сов.радио, 1968. – 440 с.
4. Kasyanchuk M., Yakymenko I., Nykolaychuk Ya. Matrix Algorithms of Processing of the Information Flow in Computer Systems Based on Theoretical and Numerical Krestenson's Basis. Proceedings of the X-th International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET-2010). L'viv-Slavske. 2010. P. 241.
5. Задірака В.К. Комп'ютерна арифметика багаторозрядних чисел / В.К. Задірака, О.С. Олексюк // Наукове видання. – К., 2003. – 264 с.
6. Касянчук М.М. Теорія алгоритмів RSA та Ель-Гамала в розмежованій системі числення Радемахера – Крестенсона / М.М. Касянчук, І.З. Якименко, О.І. Волинський, І.Р. Пітух // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 265–273.
7. Su Jun, Yatskiv V. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System. Journal Sensors & Transducers. Vol.18, Special Issue, 2013. P. 60–65.
8. Nykolaychuk Ya. M., Humennij P. V. Theoretical Bases, Methods, and Processors for Transforming Information in Galois Field Codes on the Basis of the Vertical Information Technology. Cybernetics and Systems Analysis. Vol.50, Issue 3, 2014. P. 338–347.
9. Бухштаб А.А. Теория чисел / А.А. Бухштаб. – М. : Просвещение, 1966. – 384 с.
10. Nykolaychuk Ya. M., Kasianchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation. Cybernetics and Systems Analysis. Vol. 50, Issue 5, 2014. P. 649–654.
11. Касянчук М. Концепція теоретичних положень досконалої форми перетворення Крестенсона та його практичне застосування / М. Касянчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2(20). – С. 43–48.
12. Касянчук М.М. Теорія та математичні закономірності досконалої форми системи залишкових класів / М.М. Касянчук // Праці Міжнародного симпозіуму „Питання оптимізації обчислень (ПОО–XXXV)“.

## References

1. Nykolaichuk Ya.M. Teoriia dzherel informatsii. Ternopil: TzOV „Terno–hraf”, 2010, 536 c.
2. Nykolaichuk Ya.M., Volynskiy O.I., Kulyna S.V. Teoretychni osnovy pobudovy ta struktura spets protsesoriv v bazysi Krestensona. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical Science. Khmelnytsky. 2007. Issue 3. pp.85-90.
3. Akushskiy Y.Ya, Yudytskyi D.Y. Mashynnaia aryfmetryka v ostatochnykh klassakh. M: Sov.radyo, 1968, 440 c.
4. Kasianchuk M., Yakymenko I., Nykolaychuk Ya. Matrix Algorithms of Processing of the Information Flow in Computer Systems Based on Theoretical and Numerical Krestensons Basis. Proceedings of the X–th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET–2010), Lviv–Slavske, 2010, pp. 241.
5. Zadiraka V.K., Oleksiuk O.S. Kompiuterna aryfmetryka bahatorozriadnykh chysel: Naukove vydannia – K., 2003. – 264 c.
6. Kasianchuk M.M., Yakymenko I.Z., Volynskiy O.I., Pitukh I.R. Teoriia alhorytmiv RSA ta El–Hamalia v rozmezhovani systemi chyslennia Rademakhera – Krestensona. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical Science. Khmelnytsky. 2011. Issue 3. pp.265-273.
7. Jun Su, Yatskiv V. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System. Journal Sensors & Transducers, 2013, Vol.18, Special Issue, pp.60-65.
8. Nykolaychuk Ya. M., Humennij P. V. Theoretical Bases, Methods, and Processors for Transforming Information in Galois Field Codes on the Basis of the Vertical Information Technology. Cybernetics and Systems Analysis, 2014, Vol.50, No. 3, pp. 338-347.
9. Bukhshtab A.A. Teoriia chysel. M.:Prosveshchenye, 1966, 384 c.
10. Nykolaychuk Ya. M., Kasianchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestensons Transformation. Cybernetics and Systems Analysis, 2014, Vol. 50, No 5, pp. 649-654.
11. Kasianchuk M. Kontseptsiiia teoretychnykh polozhen doskonaloj formy peretvorennia Krestensona ta yoho praktychne zastosuvannia. Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii, 2010, No 2 (20), pp. 43-48.
12. Kasianchuk M.M. Teoriia ta matematychni zakonomirnosti doskonaloj formy systemy zalyshkovykh klasiv. Pratsi Mizhnarodnoho sympoziumu „Pytannia optymizatsii obchyslen (POO–XXXV)”, Vol. 1, Kyiv–Katsyveli, 2009, pp. 306–310.

Рецензія/Peer review : 26.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Березький О.М.

## LOAD BALANCING OF RECONFIGURABLE CLUSTER SYSTEM

*Abstract - In of the article a model of load balancing between the branches of the reconfigurable cluster system is developed on purpose to productivity increase. The of high productivity of such systems is conditioned their structure represents the structure of algorithm of task decision. For of the further increase of the productivity it is suggested to minimize duration of algorithm implementation by diminishing of information duration of communication channels transfer. For of this purpose program algorithm and the computer system are presented as complete graphs, and for vertices and edges weighing coefficients are intended. For of vertices are the weighing coefficients of calculable complexity  $C_A(i)$ , productivity  $\omega(n)$ , and for edges are weighing coefficients of volumes given  $d(i, j)$ , mean value of sizes of packets  $m(i, j)$ , latence  $t_{sd}(n_n, n_o, m)$  and carrying capacity  $\tau(n_n, n_o, m)$ .*

*The of task of load balancing as task finding of such injective reflection function to the algorithm graph on graph of the distributed computer system enables to minimize duration of operation on one compute node at implementation of algorithm. Duration of calculations is determined with the resource of computation time and productivity; duration of interconnect operations on the basis of the basis of model of LogP/LogGP.*

*It of enabled to develop a model of load balancing for the increase of efficiency the use of compute node of the reconfigurable cluster system.*

*As of a result of the conducted work analytical dependence enables to balance loading by the increase of using efficiency of reconfigurable cluster system's compute node is built.*

*Keywords: load balancing, communication part, reconfigurable cluster system, duration of implementation of algorithm, graph of algorithm of the program, graph of cluster system.*

A.S. ЛЯПАНДРА

Тернопільський національний економічний університет

## БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ РЕКОНФІГУРОВАНОЇ КЛАСТЕРНОЇ СИСТЕМИ

*В статті розроблено модель розподілу навантаження між гілками реконфігурованої кластерної системи з метою підвищення її продуктивності. Висока продуктивність таких систем обумовлена тим, що їх структура відображає структуру алгоритму розв'язання задачі. Для подальшого підвищення продуктивності запропоновано мінімізувати тривалість виконання алгоритму шляхом зменшення тривалості передачі інформації комунікаційними каналами. Для цього алгоритм програми та розподілена обчислювальна система представлені у вигляді повних графів, а для вершин та ребер призначені вагові коефіцієнти. Для вершин це вагові коефіцієнти обчислювальної складності  $C_A(i)$ , продуктивності  $\omega(n)$ , а для ребер – вагові коефіцієнти обсягів даних  $d(i, j)$ , усереднених розмірів повідомлень  $m(i, j)$ , латентності  $t_{sd}(n_n, n_o, m)$  і пропускної здатності  $\tau(n_n, n_o, m)$ .*

*Визначено задачу балансування як задачу знаходження такої одно-однозначної функції відображення графу алгоритму на граф розподіленої обчислювальної системи, яка дає можливість мінімізувати тривалість операції на одному обчислювальному вузлі при виконанні алгоритму. Тривалість обчислень визначено за часовою обчислювальною складністю і продуктивністю, а тривалість комутаційних операцій – на основі моделі LogP/LogGP, що дало можливість розробити модель балансування навантаження шляхом підвищення ефективності використання обчислювального вузла реконфігурованої кластерної системи.*

*У результаті проведеної роботи побудовано аналітичні залежності збалансування навантаження, що дає можливість підвищити ефективність використання ресурсів обчислювального вузла реконфігурованої кластерної системи.*

*Ключові слова: комунікаційна частина, реконфігурована кластерна система, тривалість виконання алгоритму, граф алгоритму програми, граф розподіленої обчислювальної системи.*

### Introduction

A necessity of far calculations induces to application of parallel architectures of the computer systems. So, for example, an important task is determination of amplitude-time parameters for authentication of diseases on the basis of harmonious analysis of chemiluminescence signals of bioassays, which is characterized by considerable calculable complexity [1, 2]. The use of the computer systems will enable to get the value of parameters quicker, that it is necessary at the production of biomedical implant [3].

Parallel computer systems passed arduous evolutive process and on the present stage of wide application the cluster systems purchased due to a high productivity at the insignificant charges of time and financial resources on the stages of planning and using of ones. Application of FPGA enables run-time reconfiguration of parallel computer system according to the task structure and can substantially decrease duration of decision of one. In addition, the use of the reconfigurable cluster systems in education process gives wide possibilities for research them and verification of the analytically calculated parameters of ones.

The tasks of balancing of calculable powers of the computer systems are devoted numerous works among which will mark works of Acharva A., Chanson S. Chen S., Chen Y., Cho Y., Downey A., Du X., Harchol-Balter M., Hui C., Isert C., Jiang H., Kunz T., Lee L., Qin X., Qu Y., S., Kuo J.L., Scheuermann P., Schwan K., Setia S., Swanson D.R., Vingralek R., Voelker G., Weikum G., Winslett M., Xiao L., Zabback P., Zhang X., Zhu Y.,

Shpakovskiy G.I., Gergel V.P. and Strogonin R.G. [4, 5].

Methods of compute nodes balancing with the criterion of resources efficiency using of central processing unit, main memory, combination of processor and memory, input-outputs, combinations of processor, memory and input-outputs are developed at works of the above-mentioned researchers. However, the question of consideration of the reconfigurable cluster systems features, namely possibilities of configuration of their structure according to the algorithm of task decision and data structure, is exposed not enough full [4, 5].

The goal of this work is a model of load balancing between the branches of the reconfigurable cluster system for the purpose its productivity increase. In future this model will be used for design of the reconfigurable computer cluster systems nodes.

In the article a research object is a calculable process of the reconfigurable cluster system, and its object is a model of load balancing between the compute nodes of the reconfigurable cluster system.

### Load balancing model of the reconfigurable cluster system

For the design of industrial constructions or crash-tests it is necessary to execute  $10^{15}$  operations, for the design of flowing around of airplane -  $10^{16}$  operations, atmosphere or nuclear explosion -  $10^{17}$  operations, and that is why an increase of the productivity of the computer systems is an actual task. Diminishing of duration of algorithms implementation are got with using both technological and structural methods. The increase of frequency of system work is limited to the physical phenomena. More potential is characterized structural methods those enable parallel task decision in time and/or space. Basic implementation of calculable powers parallel were founded in D825 in 1962 years that possibility of multiprocessor machines construction was well-proven; array processor ILLIAC IV in 1972 that SIMD structure was implemented; vector-pipeline CRAY in 1976 that pipeline calculations was created; cluster Beowulf was collected with serial equipments; multi-core processors with shared and private memory; quantum computer Orion, on which it is attained exponential speed due to superposition [5]. Development of parallel architectures allows to conduct a calculation in parallel. At the decision of many tasks of digital treatment of signals, design, optimization there is a requirement in the use of base algorithms of these areas. Basic descriptions of algorithms is instrument space, time and counting complexity. Algorithm time complexity of list ranging or finding an Eulerian path tree presents  $O(\log n)$ ; finding a minimum spanning tree -  $O(\log^2 n)$ , and depth-first search -  $O(\log^3 n)$  for the parallel algorithms in tasks using graph theory. Considerable part of algorithms in algebra, such as a decision of the triangular matrix, inverse three-cornered matrix, decision of System of linear equations, using Gauss elimination method for solving linear equations, calculation of rank of matrix, matrix similarity are characterized  $O(\log^2 n)$  time complexity. Thus, perspective direction is the concerted development of parallel architectures of the computer systems and parallel algorithms [5].

According to rating of the most powerful computers in the world clusters present 86%. Such their considerable part is conditioned by the relative cheapness of ones at considerable calculable power. The top cluster system Tianhe-2 achieves productivity 33,86 PFlops [6]. However the acceleration of the parallel system largely depends on efficiency the run-time load balancing between compute nodes. Application of different methods enables to take into consideration critical factors in different task.

Divide of the reconfigurable cluster system (RCIS): managing server MS (Management Server), compute node CN (Compute Node), communication system CmS (Communication System).

Basis of managing server MS of the reconfigurable cluster system RCIS is the programmable logical integrated circuit (FPGA). One of variants its choice is application of morphological method of great number synthesis of alternative components structures on the basis of the generalized evaluation of resources of FPGA [7]. The choice of hardware tools at the conceptual design level realize with cross arrangement of critical to time structural blocks of FPGA and exchange speed of accessible part of communication matrix for the increase of efficiency of RCIS. The managing server MS carries out planning and distribution of tasks, forming of result. The increases of time informative FPGA signals descriptions achieve by the use the specialized hardware resources. Ones is chosen according to goal function [8].

The load balancing methods with the efficiency criterion of central processing unit resources are used for the central processing units of compute nodes systems considerable loading. They consist in comparing of set threshold value to the value of loading  $Z$  of pipeline  $p_{pl}$  of core  $p_{cr}$  of processor  $p_{pr}$  of node  $p_{cn}$  of the reconfigurable heterogeneous cluster system  $RCIS$  defined analytically on the basis of tasks amount  $w_{RCIS}$  core  $P_{RCIS-cn-pr-pl}$  execution, as a relation of amount of operations  $w_{RCIS-cn}$  on a node  $cn$  to computational capacity  $q_{RCIS-cn}$  of the same node:

$$Z_{RCIS-cn} = \frac{w_{RCIS-cn}}{q_{RCIS-cn}}. \tag{1}$$

At  $Z_{threshold} < Z_{RCIS-1}$  the program of balancing determines loading of other node. If  $Z_{threshold} \geq Z_{RCIS-2}$ , then

this processor can be high-usage. In case  $Z_{RCIS-2} > Z_{RCIS-3} > Z_{RCIS-4}$  there is loading of processor of node  $p_{RCIS-4}$ .

However an finished goal is duration diminishing of implementation of calculations according to the concurrent algorithm. Therefore will consider the task of time minimization of program's implementation with optimization of load partition between the processor nodes of the cluster system.

The algorithm of the concurrent program are displayed a complete graph  $AL = (I, L)$ . It's built by connection of instructions of parallel algorithm  $I = \{1, 2, \dots, N_A\}$  finite set and the set of transitions  $L \subseteq I \times I$ . The weights of calculable complexity  $C_A(i)$  of arithmetic  $C_{Aa}(i)$  and logical  $C_{Al}(i)$ ,  $i \in I$  operations are assigned vertices  $I$ . The weights of volumes given  $d(i, j)$  and middle sizes of reports  $m(i, j)$  are assigned edges  $L$  [9].

The computer architecture hardware is set a complete graph  $HW = (GNPC, L)$ . One is created by the cluster compute nodes  $N = \{1, 2, \dots, N_D\}$  finite set and interconnect connections  $L \subseteq I \times I$  set. Cluster compute nodes  $N$  are described by the weights of the productivity  $\omega(n)$ , and interconnects are described by the weight functions of latence  $t_{sd}(n_n, n_o, m)$  and channel capacity  $r(n_n, n_o, m)$ .

Data processing duration  $t_{pa}$  of parallel algorithm  $AL$  is determined as a sum of global operations duration  $t_G$  and local operations duration  $t_l$  on a compute node  $n_n$ .

The injective function  $f: AL \rightarrow HW$ ,  $f(i) = n$ ,  $x_{ni} = 1$ , and in another cases  $x_{ni} = 0$  on condition of minimization  $t_{pa}$ , is the decision of the task.

Duration of execution local operation  $t_l$  on one compute node  $n_n$ ,  $n_n \in GNPC$ , is calculated as the sum of duration calculations  $t_c$  and communications between nearby compute nodes  $t_s$  with the communication system CmS:

$$t_l = t_c + t_s. \tag{2}$$

Duration of implementation of arithmetic and logical operations is determined a processor core  $t_c$ :

$$t_c = \sum_{n=1}^{N_N} x_{ni} \frac{C_A(i)}{\omega(n)}, \tag{3}$$

$C_A(n)$  is time calculable complexity of algorithm of A.

Duration of communications between nearby compute nodes  $t_s$  defines with LogP/LogGP model [4]. It describes a computer network in terms of delay  $t_{sd}$  and overhead costs  $t_{sl}$ :

$$t_{s_{mean}} = 2(t_{sd} + 2t_{sl}) \tag{4}$$

Thus, load balancing of branches in accordance with the function  $f: AL \rightarrow HW$ , at  $\left( 2(t_{sd} + 2t_{sl}) + \sum_{n=1}^{N_N} x_{ni} \frac{C_A(i)}{\omega(n)} \right) \rightarrow \min$  is one of terms of development of the cluster system high performance. The compare of results of load balancing reconfigurable cluster system taking into account the heterogeneity (LBRCSH) and without this accounting (LB RCS) are displayed in the table ( $t_G = 1.2 \times 10^{-6}$  s):

Table 1

**Results of modelling**

Method	$n$	$C_A(i)$ , op	$t_{sl}$ , $10^{-8}$ s	$t_{sd}(n_n, n_o, m)$ , $10^{-6}$ s	$\omega(n)$ , $10^6$ op/s	$t_l$ , s	$t_{pa}$ , s
	$n_1$	562	5.0	9.8	5.0	1.32	2.52
	$n_2$	456	5.3	19.6	6.7	1.07	2.27
	$n_3$	786	4.7	14.7	4.0	2.26	3.46
LBRCSH							8.25
LB RCS	$n$	601	1.5	13.4	5.1		8.68
Gain							3.00

**Summary**

In the article the model of load partition between the branches of the reconfigurable cluster system on purpose to increase its productivity is developed. The ones' high productivity of such systems is conditioned with

their structure reflects the structure of task decision algorithm. It is suggested to minimize duration of algorithm implementation by diminishing of information transfer duration of communication channels for the further increase of the productivity. For this purpose the program algorithm and the computer system are presented as complete graphs, and for vertices and edges weights are intended. For vertices are the weights of calculable complexity  $C_A(i)$ , productivity  $\omega(n)$ , and for edges are weight of volumes given  $d(i, j)$ , middle sizes of reports  $m(i, j)$ , latency  $t_{sd}(n_n, n_o, m)$  and channel capacity  $r(n_n, n_o, m)$ .

The task of balancing is determined as the task of finding the injective function of reflect the algorithm graph to the distributed computer system graph for minimize duration of operation algorithm execution of one compute node. Calculations duration is determined with time and productivity complexity, and duration of interconnect operations accordingly to the LogP/LogGP model.

It enabled to develop the load balancing model and to increase using efficiency of the reconfigurable cluster system compute node.

As a result of the conducted work is analytical dependences of load balance that enables to increase efficiency resources using of compute node of the reconfigurable cluster system.

### References

1. Lyapandra A.S. Amplitudno-chasovi parametry bioelektromagnitnykh signaliv fazovogo rivnya biotekhnichnykh system. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnytsky. 2011. Volume 176. Issue 3. Part 1. pp.171–175.
2. Lyapandra A.S. Identyfikatsiya zakhvoryuvannya na osnovi garmoniynogo analizu khemilyuminescentnykh signaliv bioprob. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnytsky. 2007. Volume 100. Issue 6. Part 1. pp.137–144.
3. Karpinskyi M.P., Lyapandra A.S. Osoblyvosti pobudovy kompiuternoї systemy dlya biokhemiliuminometrychnykh doslidzhen. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnytsky. 2005. Volume 100. Issue 6. Part 2. pp.167–171.
4. Culler D., Karp R., Patterson D., Sahay A., Schauer K. E., Santos E., Subramonian R., and T. von Eicken. LogP: Towards a realistic model of parallel computation. In Proceedings of the fourth ACM SIGPLAN symposium on Principles and practice of parallel programming, pages 1–12. ACM Press, 1993.
5. Shpakovskiy G.I. Parallelnoe programmirovaniye i apparatura. Minsk, BGU, 2012, 184 p.
6. Home | TOP500 Supercomputer Sites. URL: <http://top500.org/>
7. Lyapandra A.S. Pidkhd do uzagalnenogo otsinyuvannya resursiv programovanykh logichnykh integralnykh skhem. Elektrotekhnichni ta kompyuterni systemy. K.: "Tekhnika", 2012. Issue 7. pp.92–96.
8. Lyapandra A.S. Zmenshennya chasovykh zatrymok PLIS u rekonfigurovanykh kompyuternykh systemakh. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnytsky. 2012. Volume 193. Issue 5. pp.147–151.
9. Lyapandra A.S. Vplyv parametriv komunikatsiinoї chastyny rekonfihurovanoї klasternoї systemy na tryvalist vykonannya alhorytmu. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2014. № 4. pp.125–127.

### Література

1. Ляпандра А.С. Амплитудно-часові параметри біоелектромагнітних сигналів фазового рівня біотехнічних систем / А.С. Ляпандра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –2011. – №3. – С. 171–175.
2. Ляпандра А.С. Идентификация захворювання на основі гармонійного аналізу хемілюмінесцентних сигналів біопроб / А.С. Ляпандра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 6. – С. 137–144.
3. Карпінський М.П. Особливості побудови комп'ютерної системи для біохемілюмінометричних досліджень / М.П. Карпінський, А.С. Ляпандра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2005. – № 6. – Ч. 2. – С.167–171.
4. Culler D., Karp R., Patterson D., Sahay A., Schauer K. E., Santos E., Subramonian R., and T. von Eicken. LogP: Towards a realistic model of parallel computation. In Proceedings of the fourth ACM SIGPLAN symposium on Principles and practice of parallel programming, pages 1–12. ACM Press, 1993.
5. Шпаковский Г.И. Параллельное программирование и аппаратура / Г.И. Шпаковский. – Минск, БГУ, 2012. – 184 с.
6. Home | TOP500 Supercomputer Sites. URL: <http://top500.org/>
7. Ляпандра А.С. Підхід до узагальненого оцінювання ресурсів програмованих логічних інтегральних схем // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: "Техніка", 2012. – № 7. – С.92–96.
8. Ляпандра А.С. Зменшення часових затримок ПЛІС у реконфігурованих комп'ютерних системах / А.С. Ляпандра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 5. – С.147–151.
9. Ляпандра А.С. Вплив параметрів комунікаційної частини реконфігурованої кластерної системи на тривалість виконання алгоритму / А.С. Ляпандра // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 4. – С.125–127.

Рецензія/Peer review : 5.1.2015 р. Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: к.т.н., доц. В.В. Яцків.



## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУ ON-LINE ПРОДАЖІВ В ЕЛЕКТРОННИХ МАГАЗИНАХ

*У статті розроблено формальні моделі, методи, інструменти та алгоритми, що у своїй сукупності формують інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету, яка дає змогу оптимізувати процеси прийняття управлінських рішень, логістики тощо. В основу даної інтелектуальної комп'ютерно-інформаційної технології покладено одну із концепцій нового тренду Data Science, а саме – концепцію Random Forest. Розроблена інтелектуальна комп'ютерно-інформаційна технологія може бути імплементована в комп'ютерно-інформаційні системи аналізу і прогнозу продажів.*

*Ключові слова: прогнозування продажів, дерева прийняття рішень, random forest.*

A. MUSHAK

Ternopil National Economic University

### INTELLIGENT COMPUTER-INFORMATION TECHNOLOGY FORECASTING ONLINE SALES IN E-SHOPS

*Abstract – In the article formal models, methods, toolware and algorithms have developed. It forms intelligent computer-information technology prediction on-line sales in e-shops of Internet. It give possibility optimizes process decision making, logistics. The foundation of intelligent computer-information technology is new trend of Data Science, namely Random Forest. Intelligent computer-information technology may be insert in the computer-information system of analysis and prediction sales.*

*Keywords: prediction sales, decision trees, random forest.*

#### Вступ

В останні роки широке використання інтелектуальних інформаційних технологій в найрізноманітніших задачах економіки спричинило бурхливий розвиток нового напрямку економічної кібернетики – Data Science. В основі технічної реалізації вирішення задач Data Science у сфері економічної кібернетики використовуються високопродуктивні комп'ютерні системи, на кшталт, суперкомп'ютери, GRID-системи тощо, які у своїй сукупності формують апаратне забезпечення хмарних комп'ютерно-інформаційних технологій.

У свою чергу розвиток напрямку Data Science в економічній кібернетиці відбувається у вигляді часткових розгалужень: Business Intelligence, Prediction Analytics, Data Mining, Statistics Data Processing, Big Data тощо. Серед наведених розгалужень широке практичне застосування набула Prediction Analytics – прогнозна аналітика. Вона використовується в основі інформаційних систем для оптимізації управлінських рішень, ризик менеджменту тощо. Серед великого сімейства практичних бізнес задач економічної кібернетики вагоме місце займають задачі прогнозу продажів в електронній комерції, наприклад, прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету.

Складність вирішення такого класу задач обумовлена не лише труднощами у використанні хмарних комп'ютерно-інформаційних технологій, а передусім їх алгоритмічного вирішення. Відомі алгоритмічні рішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах базуються на таких концепціях та інформаційно-технологічних засобах.

#### Огляд існуючих відомостей

До базових концепцій алгоритмічних рішень задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах відносяться такі: нейромережева (класи нейронних мереж – нейронні мережі у вигляді багатопшарових перцептронів, нейронні мережі Кохонена, нейронні мережі Хемінга тощо), регресійна (багатофакторна лінійна, логістична та, загалом, нелінійна регресія), концепція на основі машин опорних векторів тощо.

Серед існуючих інформаційно-технологічних засобів, які дають змогу на вище згаданих концепціях розробляти інтелектуальні комп'ютерно-інформаційні технології вирішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах можна відзначити такі: Deductor [1], StatSoft [2], Matlab [3] тощо.

Разом з тим слід відзначити. Наведені концепції алгоритмічних рішень не завжди задовольняють апріорно заданим вимогам щодо точності прогнозу, оптимальності використання ресурсів хмарних комп'ютерно-інформаційних технологій. А існуючі інформаційно-технологічні засоби є універсальними, проте не завжди оптимальними щодо розробки інтелектуальних комп'ютерно-інформаційних технологій для вирішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах.

Тому у роботі розглядається можливість розробки нової інтелектуальної комп'ютерно-інформаційної технології для вирішення задачі прогнозу on-line продажів в електронних магазинах. Таким чином, метою даної роботи є наступне.

#### Мета

Розробити інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію для вирішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету.

**Постановка задачі**

Розробити формальні моделі, інструменти та алгоритми, що у своїй сукупності формують інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію для вирішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету.

**Основна частина**

Для розробки формальних моделей, інструментів та алгоритмів, що у своїй сукупності формуватимуть інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію для вирішення задач прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету у роботі вибирається концепція Random Forest.

Для наочності висвітлення матеріалу у роботі розглядається одна абстрактна позиція (товар), яка наявна у продажі електронного магазину. Прогноз продажів по іншим позиціям здійснюватиметься аналогічно.

Нехай розглядуваним товаром є взуття, а кількість його пар – змінна  $y$ , що продається, залежить від трьох атрибутів: пори року – змінна  $x_1$ , значення якої належить множині {зима, весна, літо, осінь}, розміру – змінна  $x_2$ , значення якої належить множині {40, 42, 44} та кольору – змінна  $x_3$ , значення якої належить множині {білий, чорний}.

У такому разі кількість пар взуття, що продається формально можна описати у вигляді функції від трьох змінних:

$$y = f(x_1, x_2, x_3).$$

На практиці кількість пар проданого взуття  $y$  залежить від більшої кількості факторів, тобто незалежних змінних:  $x_4, x_5, \dots$ . Але не завжди можна знати їх значення. Тому кількість проданих пар взуття  $y$  є випадковою величиною.

Враховуючи цей факт, задача прогнозу продажу кількості пар взуття  $y$  уточнюється наступним чином – потрібно здійснити прогноз продажу середньої кількості пар взуття, тобто  $\mathbf{M}y$ .

Нехай дано таблицю даних проданої кількості пар взуття попередньо, яка залежить від їх атрибутів (табл.1).

Очевидно, що завжди можна таку таблицю даних розбити на дві сукупності даних. Перша сукупність – навчаюча сукупність, друга – тестова сукупність.

Нехай перших п'ятнадцять елементів таблиці даних утворюють навчаючу сукупність, а других п'ятнадцять елементів таблиці даних утворюють тестову сукупність.

Виходячи з основної сутності концепції Random Forest потрібно згенерувати ліса дерев прийняття рішень різної висоти із випадковим генеруванням в них вершин і з випадковими навчаючими елементами з навчаючої сукупності. Значення проданої кількості пар взуття, змінної  $y$  розміщаються у листках дерев.

Ліс дерев прийняття рішень найменшої висоти – 1 представляє собою пеньки. Діючи за правилами, наведеними вище, одержуємо стохастичним чином ліс із пеньків (рис.1).

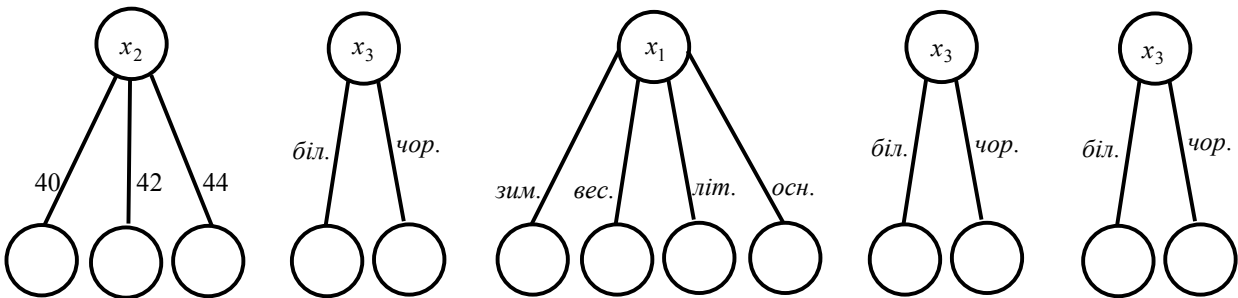


Рис.1. Випадковий ліс дерев прийняття рішень висотою 1

Як видно з рис.1 та табл.1, середнє значення проданої кількості пар взуття у першому зліва листку першого дерева дорівнює  $\mathbf{M}y(40) = 80 \cdot 2/2 + 90 \cdot 0/2 \approx 80$ , у другому листку –  $\mathbf{M}y(42) = 80 \cdot 4/10 + 90 \cdot 6/10 \approx 86$ , у третьому листку –  $\mathbf{M}y(44) = 80 \cdot 1/3 + 90 \cdot 2/3 \approx 87$ .

Відповідно до рис.1 та табл.1, середнє значення проданої кількості пар взуття у першому зліва листку другого дерева дорівнює  $\mathbf{M}y(\text{біл.}) = 80 \cdot 4/9 + 90 \cdot 5/9 \approx 86$ , у другому листку –  $\mathbf{M}y(\text{чор.}) = 80 \cdot 3/6 + 90 \cdot 3/6 \approx 85$ .

Відповідно до рис.1 та табл.1, середнє значення проданої кількості пар взуття у першому зліва листку третього дерева дорівнює  $\mathbf{M}y(\text{зим.}) = 80 \cdot 1/2 + 90 \cdot 1/2 = 85$ , у другому листку –  $\mathbf{M}y(\text{вес.}) = 80 \cdot 0/3 + 90 \cdot 3/3 = 90$ , у третьому листку –  $\mathbf{M}y(\text{літ.}) = 80 \cdot 4/6 + 90 \cdot 2/6 \approx 83$ , у четвертому листку –  $\mathbf{M}y(\text{осн.}) = 80 \cdot 2/4 + 90 \cdot 2/4 = 85$ .

Відповідно до рис.1 та табл.1 середні значення проданої кількості пар взуття у третьому та четвертому деревах аналогічні до другого дерева.

Таблиця 1

## Кількість проданих пар взуття

	$y$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1.	80	зима	40	чорний
2.	80	осінь	42	чорний
3.	90	весна	44	білий
4.	80	осінь	42	чорний
5.	90	весна	42	білий
6.	80	літо	40	білий
7.	90	осінь	42	чорний
8.	90	зима	42	чорний
9.	80	літо	44	білий
10.	90	літо	42	білий
11.	90	весна	42	білий
12.	90	літо	44	білий
13.	80	літо	42	білий
14.	90	осінь	42	чорний
15.	80	літо	42	білий
16.	90	весна	42	білий
17.	90	літо	42	білий
18.	80	зима	40	чорний
19.	90	весна	42	білий
20.	90	літо	44	білий
21.	80	весна	42	чорний
22.	90	літо	40	чорний
23.	80	зима	44	білий
24.	90	весна	42	чорний
25.	80	літо	42	білий
26.	90	осінь	44	білий
27.	90	зима	44	білий
28.	90	осінь	42	чорний
29.	90	літо	42	білий
30.	80	весна	42	білий

Аналогічно до вище наведеного розглядається випадковий ліс з висотою дерев не більше ніж два яруси (рис.2).

З рис.2 та табл.1 видно, що середні значення проданої кількості пар взуття у першому зліва листку першого дерева дорівнює  $M_y(\text{біл.}, 40) = 80 \cdot 1/1 + 90 \cdot 0/1 = 80$ , у другому листку –  $M_y(\text{біл.}, 42) = 80 \cdot 2/5 + 90 \cdot 3/5 = 86$ , у третьому листку –  $M_y(\text{біл.}, 44) = 80 \cdot 1/3 + 90 \cdot 2/3 \approx 87$ , у четвертому листку –  $M_y(\text{чор.}, 40) = 80 \cdot 1/1 + 90 \cdot 0/1 = 80$ , у п'ятому –  $M_y(\text{чор.}, 42) = 80 \cdot 2/5 + 90 \cdot 3/5 = 86$ , у шостому –  $M_y(\text{чор.}, 44) = 0$ .

Відповідно до рис.2 та табл.1, середні значення проданої кількості пар взуття у першому зліва листку другого дерева дорівнює  $M_y(\text{зим.}, \text{біл.}) = 0$ , у другому листку –  $M_y(\text{зим.}, \text{чор.}) = 80 \cdot 1/2 + 90 \cdot 1/2 = 85$ , у третьому листку –  $M_y(\text{вес.}, \text{біл.}) = 80 \cdot 0/3 + 90 \cdot 3/3 = 90$ , у четвертому листку –  $M_y(\text{вес.}, \text{чор.}) = 0$ , у п'ятому –  $M_y(\text{літ.}, \text{біл.}) = 80 \cdot 4/6 + 90 \cdot 2/6 \approx 83$ , у шостому –  $M_y(\text{літ.}, \text{чор.}) = 0$ , у сьомому –  $M_y(\text{осн.}, \text{біл.}) = 0$ , у восьмому –  $M_y(\text{осн.}, \text{чор.}) = 80 \cdot 2/4 + 90 \cdot 2/4 = 85$ .

Також розглядається випадковий ліс з висотою дерев не більше ніж три яруси, приклад дерева якого наведено на рис.3.

Для даної задачі розглядається лише три види випадкових лісів. Загалом, кількість випадкових лісів відповідає кількості атрибутів від яких залежить цільова змінна, тобто та, яка прогнозується.

З рис.3 та табл.1 можна обчислити середні значення проданої кількості пар взуття у кожному із листку дерева прийняття рішень висотою у три яруси, тобто:  $M_y(\text{зим.}, 40, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{зим.}, 40, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{зим.}, 42, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{зим.}, 42, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{зим.}, 44, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{зим.}, 44, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 40, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 40, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 42, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 42, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 44, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{вес.}, 44, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 40, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 40, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 42, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 42, \text{чор.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 44, \text{біл.})$ ,  $M_y(\text{літ.}, 44, \text{чор.})$ ,

$\text{My}(\text{осн.}, 40, \text{біл.}), \text{My}(\text{осн.}, 40, \text{чор.}), \text{My}(\text{осн.}, 42, \text{біл.}), \text{My}(\text{осн.}, 42, \text{чор.}), \text{My}(\text{осн.}, 44, \text{біл.}), \text{My}(\text{осн.}, 44, \text{чор.}).$

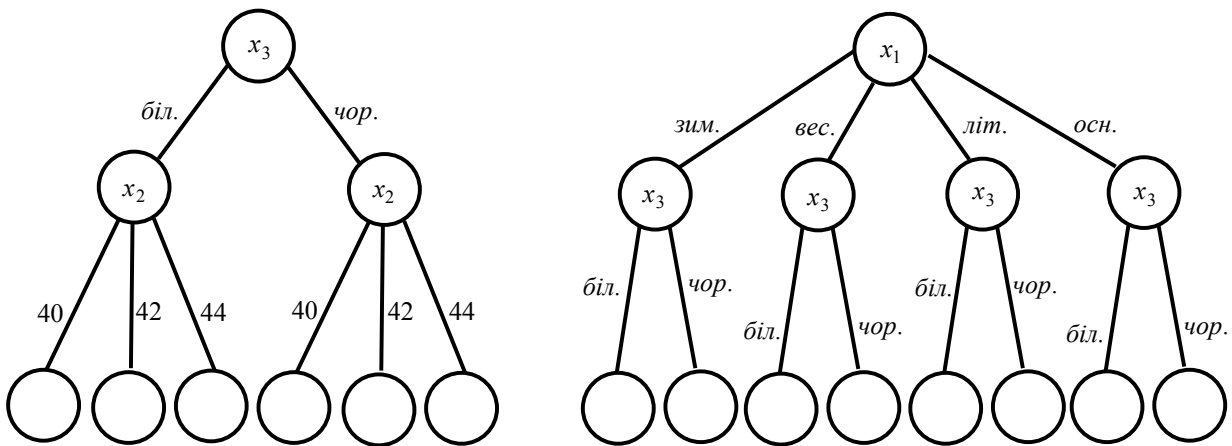


Рис.2. Випадковий ліс дерев прийняття рішень висотою 2

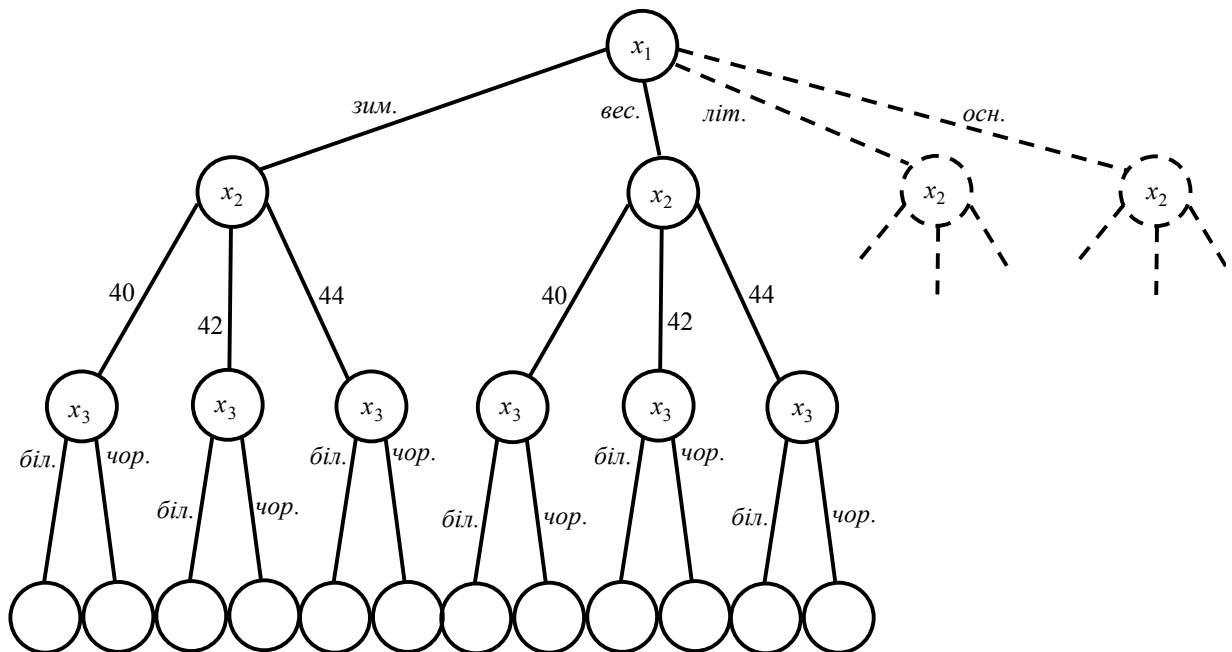


Рис.3. Приклад дерева прийняття рішень висотою 3 з випадкового лісу

Прийняття рішення щодо прогнозу значення продажу тої чи іншої кількості пар взуття здійснюється кожним окремим деревом прийняття рішень випадкового лісу. Загальне рішення випадкового лісу щодо прогнозного значення продажу кількості пар взуття одержують шляхом голосування усіх дерев прийняття рішень випадкового лісу. Остаточним вважається те рішення за яке проголосувало найбільше дерев прийняття рішень даного випадкового лісу. Також можливий випадок, коли виконується зважене голосування дерев прийняття рішень випадкового лісу. Вага кожного дерева прийняття рішень у голосуванні визначається його точністю прийнятого рішення, яка визначається на основі тестової сукупності.

Загалом потрібно відзначити, що кількість дерев прийняття рішень у кожному із випадкових лісів вибирається максимально можливою для забезпечення стійкості статистичних оцінок статистичних параметрів.

Інтегральне та остаточне рішення сукупності випадкових лісів щодо прогнозного значення продажу кількості пар взуття одержують шляхом їх голосування.

Таким чином, усе вище наведене: формальні моделі, методи, інструменти та алгоритми у своїй сукупності формують інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету.

Тестування даної інтелектуальної комп'ютерно-інформаційної технології прогнозу on-line продажів в електронних магазинах виконується на тестовій сукупності, тобто на других п'ятнадцяти елементах таблиці даних, які мають порядкові номери з 16 по 30.

Процедура тестування роботи технології виконується наступним чином. Кожен зокрема елемент

тестової сукупності тестує роботу технології, потім кожна пара елементів тестової сукупності тестує роботу технології, пізніше кожна трійка тестової сукупності тестує роботу технології, кожна четвірка, кожна п'ятірка і т.д. В результаті одержують множину значень похибки. Ця множина значень представляє собою вибірку випадкових значень похибки прогнозу. Тому для повного представлення похибки прогнозу обчислюється гістограма щільності розподілу імовірностей. У випадку, коли потрібно похибку представити у вигляді числового значення, то по вибірці її значень обчислюються статистичні оцінки: математичного сподівання, дисперсії, а також довірчі імовірності цих значень.

### **Висновки**

У роботі розроблено формальні моделі, методи, інструменти та алгоритми, що у своїй сукупності формують інтелектуальну комп'ютерно-інформаційну технологію прогнозу on-line продажів в електронних магазинах Інтернету, яка дає змогу оптимізувати процеси прийняття управлінських рішень, логістики тощо.

### **Література**

1. [www.basegroup.ru](http://www.basegroup.ru).
2. [www.statsoft.ru](http://www.statsoft.ru).
3. [www.mathwork.com](http://www.mathwork.com).

### **References**

1. [www.basegroup.ru](http://www.basegroup.ru).
2. [www.statsoft.ru](http://www.statsoft.ru).
3. [www.mathwork.com](http://www.mathwork.com).

Рецензія/Peer review : 6.1.2015 р. Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Пастух О.А.

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ЗВ'ЯЗАНОЇ ВОЛОГИ В КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛАХ

*Особливістю капілярно-пористих матеріалів є наявність в них як вільної, так і зв'язаної вологи. Наявність вільної вологи в зерні як характерному представнику капілярно-пористих матеріалів шкідливо впливає на його зберігання, оскільки вільна волога сприяє протіканню в зерні складних біологічних та хімічних процесів, завдяки яким виділяється тепло і в результаті чого зерно втрачає свої споживчі властивості.*

*В статті описано досить простий метод контролю вмісту зв'язаної вологи в капілярно-пористих матеріалах, який базується на вимірюванні коефіцієнта діелектричних втрат на двох частотах для різних температур.*

*Ключові слова: волога, контроль, пористий, втрати, діелектричний, зерно.*

O.M. KUTSEVOL  
Vinnytsia, Ukraine

## CONTROL METHOD OF THE CONTENT OF THE CONNECTED MOISTURE IN CAPILLAR-POROUS MATERIALS

*Feature of capillary and porous materials is availability in them of both free, and connected moisture. Availability of free moisture in grain as to the characteristic representative of capillary and porous materials harmfully influences his storage as free moisture renders assistance to course in grain of difficult biological and chemical processes thanks to which heat is allocated and therefore grain loses the consumer properties.*

*In article quite simple control method of contents of the connected moisture in capillary and porous materials which is based on measurement of coefficient of dielectric losses at two frequencies for different temperatures is described.*

*Keywords: moisture, control, porous, losses, dielectric, grain.*

### Постановка задачі

Одним із важливих параметрів більшості технологічних процесів, за яким визначають якість готової продукції, є вологість. Дослідження, спрямовані на удосконалення та розроблення нових методів контролю вологості та приладів на їх основі, проводяться у всьому світі. Широкий спектр досліджень у галузі контролю вологості викликаний практичними потребами народного господарства в експресних та високоточних методах та засобах вологометрії, що забезпечують високу достовірність вимірювальної інформації.

Одним із перспективних напрямів даних досліджень є високочастотна діелектрометрія, яка дозволяє відносно простими засобами здійснювати експресний контроль вологості із високою достовірністю. Застосування методу високочастотної діелектрометрії ускладнюється при контролі вологості капілярно-пористих матеріалів, характерними представниками яких є зерно пшениці та інших злакових культур.

Зерно пшениці та інших злакових культур є складною капілярно-пористою системою із значним вмістом живої білкової речовини. В таких системах волога знаходиться як у вільному, так і у зв'язаному стані.

Вільна і зв'язана волога сильно відрізняється своїми діелектричними параметрами. Відносна діелектрична проникність вільної вологи приблизно дорівнює 81, тоді як у зв'язаної вологи вона не перевищує 2...3.

Вільна волога сильно впливає на умови зберігання зерна, інтенсифікує протікання біохімічних процесів, завдяки яким підвищується температура, що в свою чергу призводить до ще більшої інтенсивності біохімічних реакцій. При цьому якість зерна погіршується, а в деяких випадках відбувається "самозаймання" зерна.

Найкращою умовою зберігання капілярно-пористих матеріалів, зокрема зерна та зернопродуктів, є наявність в них тільки зв'язаної вологи, тому одним із особливо важливих завдань є пошук методів, що дозволили б визначати вміст в капілярно-пористих матеріалах саме зв'язаної вологи. Основною метою проведеного дослідження є розроблення діелектрометричного методу контролю вмісту зв'язаної вологи в капілярно-пористих матеріалах, до яких відноситься зерно пшениці та інші злакові культури.

### Аналіз досліджень та публікацій

Значний об'єм науково-дослідних робіт, спрямованих на розвиток теорії електричних методів вологометрії, узагальнено в працях Кричевського Є. С. [1], Секанова Ю. П. [2], Берлінера М. А. [3] та ін. Проте, їхні роботи спрямовані на розроблення та удосконалення методів та засобів контролю повної вологості в досліджуваних матеріалах.

### Формулювання цілей

Основною метою проведеного дослідження є розроблення діелектрометричного методу контролю вмісту зв'язаної вологи в капілярно-пористих матеріалах, до яких відноситься зерно пшениці та інші злакові культури.

### Результати досліджень

Капілярно-пористі матеріали характеризуються значним вмістом зв'язаної вологи  $W_{зв} = 5...15\%$ , яка за своїми діелектричними властивостями відрізняється від вільної вологи. Діелектрична проникність вільної вологи  $\epsilon_g = 80...81$ , тоді як зв'язана волога має  $\epsilon_{зв} = 2...3$ , що незначно відрізняється від

діелектричної проникності сухого залишку [4]. Така велика кількість зв'язаної води в капілярно-пористих матеріалах пояснюється наявністю в них значної площі внутрішньої поверхні шпарин, на якій утримується зв'язана вода у твердому стані.

Дослідження характеристик капілярно-пористих матеріалів [5] показали, що є можливість визначати як повну вологість матеріалів, так і кількість в них зв'язаної води. В основу метода покладена залежність коефіцієнта діелектричних втрат  $k$  від вологості  $W$  (рис. 1). Коефіцієнт діелектричних втрат вимірюється на двох радіочастотах  $f_1$  та  $f_2$ . При цьому вологості  $W_1$  відповідатиме  $\Delta k_1 = k_{1f1} - k_{1f2}$ . Із дією на матеріал теплового поля вологість буде зменшуватись, зменшуватиметься також  $\Delta k$ . В момент часу, коли  $\Delta k = 0$ , вільна вода повністю випарувалась, значення  $k_{f1} = k_{f2}$  відповідатиме кількості

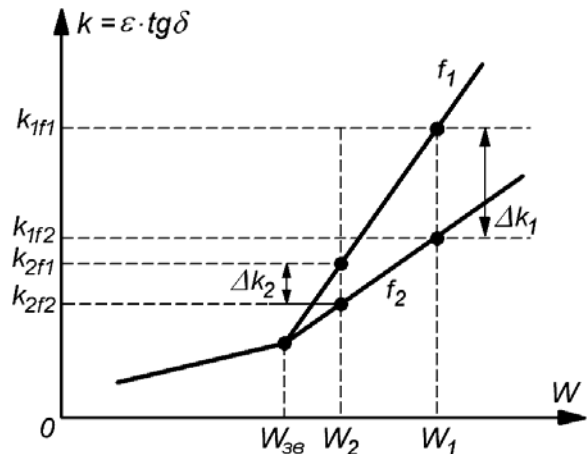


Рис. 1. Залежність коефіцієнта діелектричних втрат матеріалу від вологості

зв'язаної води в досліджуваному капілярно-пористому матеріалі і може бути використаним в якості ефективного інформативного параметра при її контролі.

Рівняння прямої, що проходить через дві точки (рис. 2)

$$y_1 - y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} (x_1 - x)$$

шляхом нескладних перетворень отримує вигляд

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \cdot x + \frac{y_2 \cdot x_1 - y_1 \cdot x_2}{x_1 - x_2} = k \cdot x + b.$$

Рівняння прямої в загальній формі  $Ax + Bx + C = 0$  також легко перетворюється до вигляду (2):

$$y = -\frac{A}{B}x - \frac{C}{B}.$$

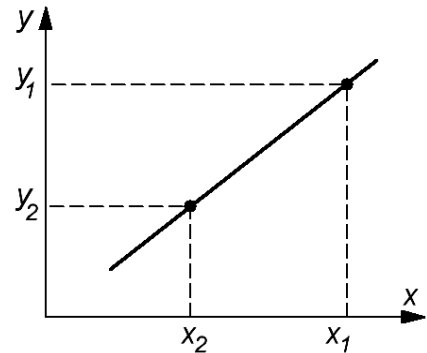


Рис. 2. Визначення рівняння прямої

З виразів (2) і (3) очевидно, що

$$B = x_1 - x_2; A = y_1 - y_2; C = y_2 \cdot x_1 - y_1 \cdot x_2. \tag{4}$$

Графіку  $k(f_1)$  (рис. 3) відповідає загальне рівняння:

$$A_1 \cdot W + B_1 \cdot k + C_1 = 0, \tag{5}$$

а графіку  $k(f_2)$  – рівняння:

$$A_2 \cdot W + B_2 \cdot k + C_2 = 0. \tag{6}$$

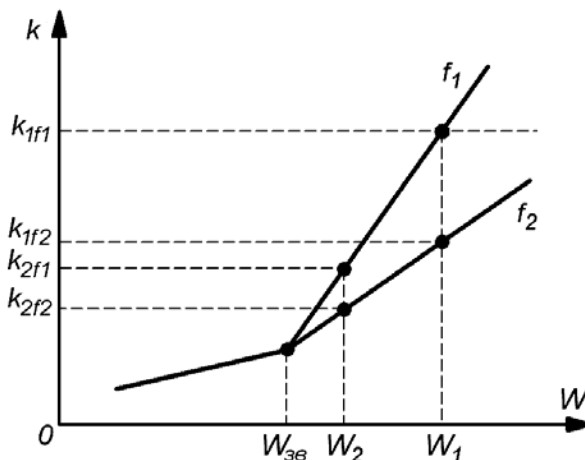


Рис. 3. Залежність коефіцієнта діелектричних втрат від вологості для різних частот

Враховуючи вирази (4), (5) і (6) запишемо рівняння (5) і (6) в координатах вологості і коефіцієнта діелектричних втрат, об'єднуючи їх в систему:

$$\begin{cases} (k_{1f1} - k_{2f1}) \cdot W + (W_1 - W_2) \cdot k + (k_{2f1} \cdot W_1 - k_{1f1} \cdot W_2) = 0, \\ (k_{1f2} - k_{2f2}) \cdot W + (W_1 - W_2) \cdot k + (k_{2f2} \cdot W_1 - k_{1f2} \cdot W_2) = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Визначаємо абсцису точки перетину цих графіків, яка є значенням зв'язаної вологості в матеріалі:

$$W_{36} = \frac{(k_2 f_2 \cdot W_1 - k_1 f_2 \cdot W_2) - (k_2 f_1 \cdot W_1 - k_1 f_1 \cdot W_2)}{(k_1 f_1 - k_2 f_1) - (k_1 f_2 - k_2 f_2)} \quad (8)$$

Враховуючи, що в системі (7)  $B_1 = B_2$ , спростуємо вираз (8):

$$W_{36} = \frac{W_1 \cdot (k_2 f_2 - k_2 f_1) + W_2 \cdot (k_1 f_1 - k_1 f_2)}{(k_1 f_1 - k_2 f_1) - (k_1 f_2 - k_2 f_2)} \quad (9)$$

Отриманий вираз (9) є математичною моделлю, яка кількісно пов'язує зв'язану вологість з коефіцієнтом діелектричних втрат матеріалу.

Процес знаходження значення зв'язаної вологості передбачає визначення дійсної діелектричної проникності

$$\varepsilon_M = \frac{C_M}{C_0},$$

та тангенса кута діелектричних втрат

$$\text{tg } \delta = \sqrt{\frac{C_6}{C_0} - 1},$$

де  $C_6$  – досліджувана ємність матеріалу;

$C$  – сумарна ємність, яка складається з дійсної ємності  $C_M$  і початкової ємності чутливого елемента  $C_0$ .

За допомогою цих інформативних параметрів знаходиться коефіцієнт діелектричних втрат на частотах  $f_1$  і  $f_2$  при початковій температурі, визначається приріст коефіцієнта діелектричних втрат та повний вміст вологі в матеріалі. Під дією теплового поля підсушується досліджуваний зразок, а контрольні операції повторюються до того часу, поки  $\Delta K$  не стане дорівнювати нулю. Значення вологості в цей момент відповідатиме вмісту зв'язаної вологі в матеріалі.

Враховуючи це, послідовність контрольних та допоміжних операцій буде наступною (рис. 4).

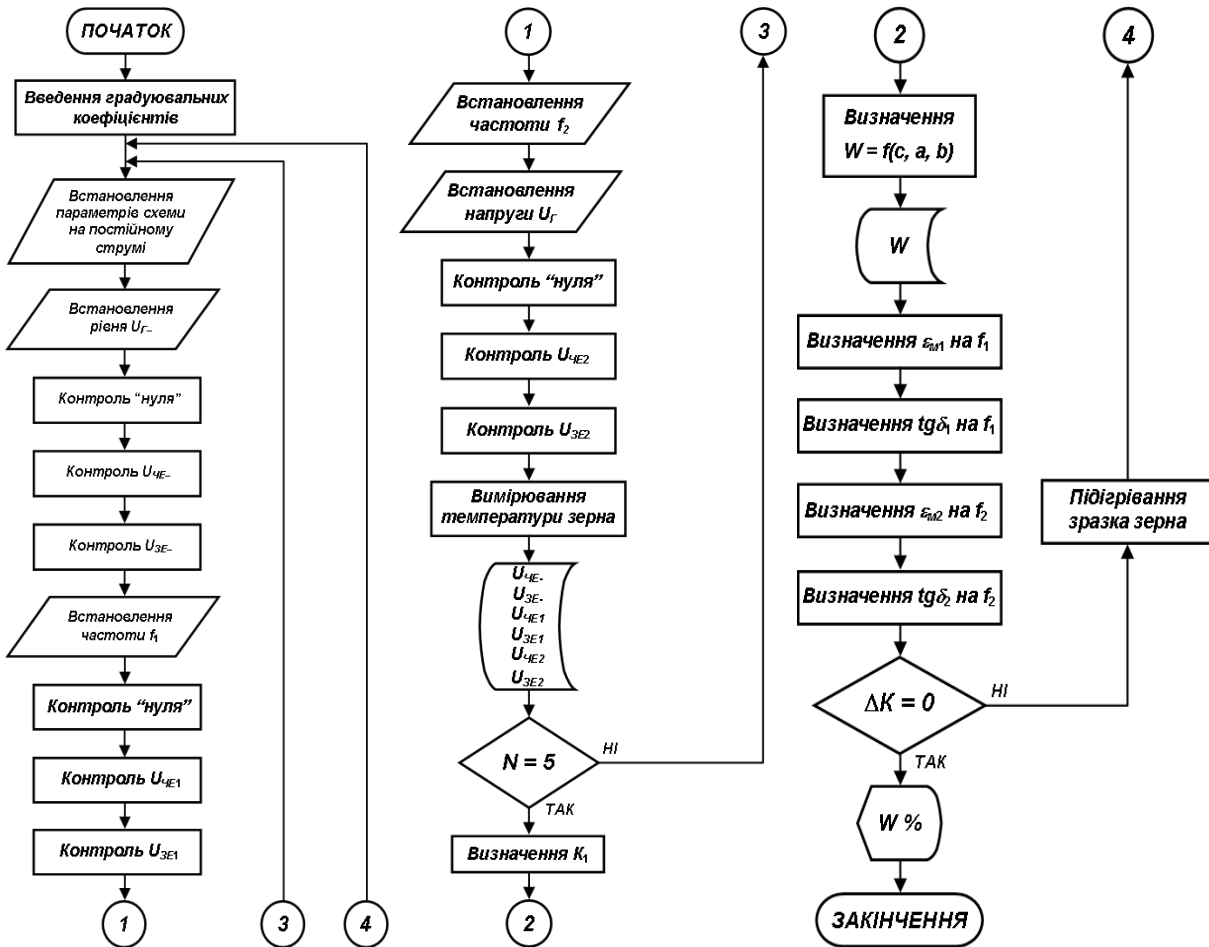


Рис. 4. Алгоритм контролю вмісту зв'язаної вологі

Реалізація розробленого алгоритму (рис. 4) передбачає наявність двох генераторів гармонічних



коливань з вихідними сигналами  $f_1$  і  $f_2$ , оскільки в основу побудови засобу контролю вологості покладений двочастотний метод визначення вологості, генератор напруги постійного струму  $\Gamma 3$  та термостат  $ТС$ . Головним елементом засобу контролю вологості є первинний перетворювач, в якому інформація про вологість перетворюється в пропорційний електричний сигнал. Аналогові гармонічні сигнали  $U_{\Gamma 1}$  і  $U_{\Gamma 2}$  з частотами  $f_1$  і  $f_2$  відповідно за допомогою комутатора  $K1$  мають по черзі подаватись на первинний перетворювач  $ПП$ , що утворений послідовно з'єднаними зразковим та чутливим елементом ємнісного типу, в якому знаходиться досліджуваний зразок зерна. Інформативні параметри: напруга генератора  $U_{\Gamma}$ , напруга зразкового елемента  $U_{зЕ}$  та напруга чутливого елемента  $U_{чЕ}$  через буферні каскади  $БК$  потрапляють на мікроконтролер.

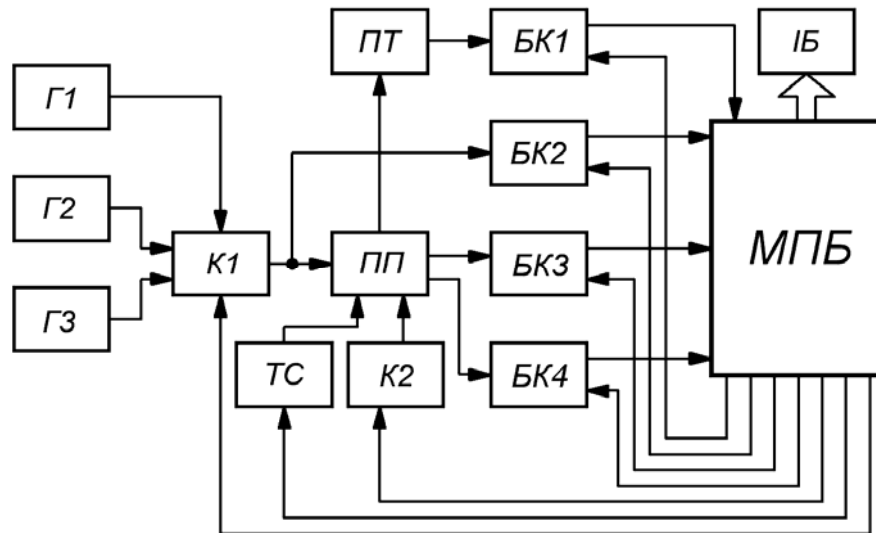


Рис.5. Структурна схема засобу контролю зв'язаної вологості

Для усунення похибки засобу контролю за рахунок зміни температури навколишнього середовища до його структурної схеми додається перетворювач температури  $ПТ$ , інформація з якого у вигляді рівня напруги потрапляє на мікроконтролер.

Для виконання операції встановлення “нуля” в  $ПП$  передбачене коло імітації порожнього чутливого елемента, яке вмикається комутатором  $K2$ .

### Висновки

Отримані теоретичні обґрунтування, математична модель, блок-схема алгоритму та структура можуть бути покладені в основу побудови вологоміра зв'язаної вологи. Результати проведеного дослідження також можуть бути використані в науково-дослідних установах аграрної та суміжних галузей.

### Література

1. Кричевский Е. С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых / Е. С. Кричевский. – М. : Недра, 1972. – 215 с.
2. Секанов Ю. П. Влагометрия сыпучих и волокнистых растительных материалов : монография / Ю. П. Секанов. – М. : ВИМ, 2001. – 190 с. – ISBN-5-7010-0283-7.
3. Берлинер М.А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
4. Федоткин И. М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности / И. М. Федоткин, В. П. Клочков. – К. : Техніка, 1974. – 320 с.
5. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

### References

1. Krichevskiy E. S. Vyisokochastotnyiy kontrol vlazhnosti pri obogaschenii poleznyih iskopaemyih. Moscow, Nedra, 1972. – 215 c.
2. Sekanov Y. P. Vlagometriya syipuchih i voloknistyih rastitelnyih materialov : monografiya. Moscow, VIM, 2001. – 190 c.
3. Berliner M. A. Izmereniya vlazhnosti. Moscow, Energiya, 1973. – 400 c.
4. Fiziko-tehnicheskie osnovyi vlagometrii v pischevoy promyishlennosti / I. M. Fedotkin, V. P. Klochkov. Kyiv, Tehnika, 1974. – 320 c.
5. Lyikov A.V. Teoriya sushki. Moscow, Energiya, 1968. – 472 c.

Рецензія/Peer review : 26.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Паламарчук І. П.

## П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ РОБОТЕХНІКИ

В роботі описані п'єзоелектричні перетворювачі для роботехніки. Ці перетворювачі можуть використовуватися в якості датчиків дотику, вимірювачів відстані до об'єктів або перешкод, для вимірювання статичних та динамічних сил, а також в якості електроакустичних перетворювачів для звукової індикації моментів надходження або виконання команди, для оповіщення аварійної або нештатної ситуації та ін. Розглянуто конструкції п'єзоелектричних датчиків дотику з мономорфним і біморфним п'єзоелектричними елементами. Застосування біморфної конструкції дозволяє збільшити чутливість датчиків дотику. Розглянута конструкція п'єзоелектричного датчика сили з ультразвуковим концентратором. Застосування ультразвукових концентраторів дозволяє збільшити чутливість датчиків сили. Розглянута конструкція електроакустичного перетворювача з резонатором. Застосування резонаторів дозволяє збільшити звукову потужність вихідного сигналу електроакустичних перетворювачів.

Ключові слова: п'єзоелектричні перетворювачі, датчики дотику, сил, відстаней, електроакустичні перетворювачі.

ZH.V. SOTULA, K.V. BAZILO, V.V. TUZ  
Cherkasy State Technological University

### PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS FOR ROBOTICS

*Abstract – Piezoelectric transducers are widely used in electroacoustics, underwater acoustics, ultrasonic, medical and measuring equipment, scanning probe nanomicroscopes, robotics, piezoengines, and other areas of science and techniques. Recent works in the field of piezoelectric sensors and transducers allow providing new approaches to the constructing of piezoelectric transducers. The paper describes the piezoelectric transducers for robotics. These transducers can be used as touch sensors, distance meters to objects or obstacles, to measure static and dynamic forces, and also as electroacoustic transducers for sound indication of the moment of receipt, or command execution to alert emergency or contingency situation, etc. Designs of piezoelectric touch sensors with monomorphic and bimorph piezoelectric elements are discussed. Application of bimorph structure increases the sensitivity of touch sensors. Design of piezoelectric force sensor with ultrasonic concentrator is discussed. Application of ultrasonic concentrators increases the sensitivity of force sensors. Design of electroacoustic transducer with resonator is discussed. Application of resonators increases the sound power of output signal of electroacoustic transducers.*

*Key words: piezoelectric transducers, touch sensor, force sensor, distance meter, electroacoustic transducers.*

### Вступ

П'єзоелектричні перетворювачі дозволяють вирішувати різноманітні завдання: вимірювання механічних параметрів (зусиль, тисків, прискорень, маси, кутових швидкостей, моментів, деформацій тощо), теплових приладів (термодатчиків, датчиків витрат, вакууму, вимірювачів електричних параметрів, датчиків теплових потоків), пристроїв для контролю складу, концентрацій газів, вологості, мікрмас. За роздільною здатністю та точністю ці пристрої в багатьох випадках перевершують перетворювачі, виконані на інших фізичних принципах [1–6].

Вельми перспективним є застосування ПП в інформаційних і комунікаційних технологіях і роботехніці.

Останні роботи в області п'єзоелектричних датчиків і перетворювачів дозволили створити нові підходи до побудови п'єзоелектричних перетворювачів, в тому числі, і для роботехніки [1–4].

Отже, метою даної роботи є огляд і аналіз можливостей проектування п'єзоелектричних перетворювачів для роботехніки.

### Основна частина

П'єзоелектричні перетворювачі в роботах можуть виконувати наступні задачі (функції).

#### Датчики дотику

Залежно від кількості п'єзоелементів використовуваних в п'єзоелектричних перетворювачах, їх можна розділити на мономорфні і біморфні.

П'єзоелектричні датчики дотику на прямому п'єзоелекті мають порівняно невисоку чутливість і певні недоліки при фіксації моменту дотику.

Резонансні п'єзодатчики на основі мономорфних п'єзоелементів мають більш високу чутливість. Один з варіантів датчика показаний на рис. 1. Цей датчик містить п'єзоелемент 1, з двома електродами (п'єзотрансформатор), генератор 2, ультразвуковий (УЗ) конічний концентратор 3, елемент дотику 4.

При торканні елемент 4 діє на вершину концентратора 3, що призводить до зміни вихідної напруги п'єзоелемента 1.

Ще більш високу чутливість має датчик з біморфним п'єзоелементом (рис. 2). Цей датчик містить біморфний елемент, що складається з металеві пластина 1 і п'єзоелемента 2, закріплених на основі 3, і елемент дотику 4.

#### Вимірювачі відстаней

П'єзоелектричні датчики застосовуються як детектори близькості на дистанціях, які недоступні, наприклад, індуктивним і ємнісним датчикам; як детектори об'єктів, що не розпізнаються оптичними датчиками через прозорість і колір; а також в якості вимірювачів дистанції за відбитим ультразвуковим сигналом.

Типовим застосуванням п'єзоелектричних датчиків є вимірювання відстаней в тому випадку, коли поверхня об'єкта являє собою відбиваючу мішень. Безконтактність вимірювань в більшості випадків є

визначальним фактором для вибору методу контролю.

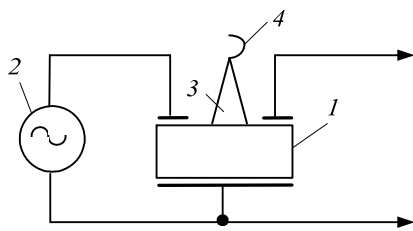


Рис. 1. Схема підключення датчика дотику:  
1 – п'єзоелемент; 2 – генератор;  
3 – УЗ конічний концентратор; 4 – елемент дотику

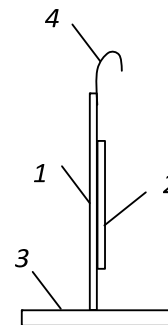


Рис. 2. Датчик дотику з біморфним п'єзоелементом:  
1 – металева пластина; 2 – п'єзоелемент;  
3 – основа; 4 – елемент дотику

П'єзоелектричні датчики широко застосовуються в так званому контролі руху, під яким розуміються процеси управління швидкістю і позицією об'єкта.

Вимірювач відстані являє собою приймач-передавач ультразвукових коливань – він змінно перемикається в режим випромінювання й в режим прийому.

Принцип дії вимірювачів відстаней – зондування об'єкта щодо високочастотними акустичними хвилями. Випромінювач забезпечує перетворення електричної енергії в енергію акустичних коливань п'єзоелемента. При прийомі відбитих від об'єкта хвиль відбувається перетворення їх енергії в електричну енергію інформаційного сигналу.

Таке зондування в самому простому випадку дозволяє зафіксувати присутність об'єкта в зоні випромінювання, а при наявності вбудованої електронної схеми забезпечує визначення проміжку часу між випромінюванням і прийомом ультразвукової хвилі, що еквівалентно дистанції до об'єкта.

Високочастотні випромінювачі виготовляють з мономорфних п'єзоелементів. Вони мають більш вузьку діаграму спрямованості.

Діаграма спрямованості визначається такими факторами, як частота ультразвукових коливань, розміри, форма і акустичні параметри п'єзоелектричного випромінювача.

Низькочастотні випромінювачі виготовляють на основі біморфних п'єзоелементів.

Для забезпечення широкої смуги пропускання може використовуватися просторовий електромеханічний негативний зворотний зв'язок [7], або датчики з додатковими електричними або механічними коливальними системами [3]. В якості приймачів звуку використовують біморфний елементи з широкою смугою пропускання.

**Датчики сил**

Тут можливі два варіанти – контроль динамічних сил (механічних напружень, параметрів вібрацій) і статичних.

У першому випадку використовуються п'єзодатчики на прямому п'єзоєфекті. Датчики на біморфних п'єзоелементах мають на порядок вищу чутливість, але порівняно вузький діапазон робочих частот. Для цих датчиків можуть застосовуватися узгоджувальні підсилювачі напруги або заряду.

Для контролю статичних зусиль можуть використовуватися резонансні п'єзодатчики на мономорфних п'єзоелементах або на біморфних п'єзоелементах.

Проста схема підключення резонансного п'єзодатчика з ультразвуковим концентратором і його вихідні характеристики показані на рис. 3, 4.

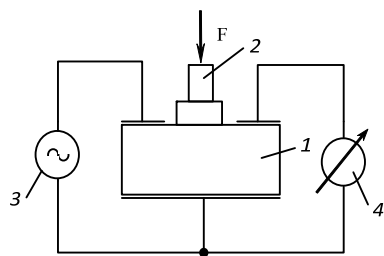


Рис. 3. Схема підключення датчика сили:  
1 – п'єзотрансформатор; 2 – ступінчастий концентратор;  
3 – генератор; 4 – вимірювальний пристрій

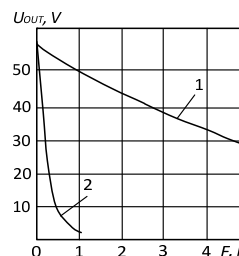


Рис. 4. Вихідна характеристика датчика сили:  
1 – без концентратора; 2 – з концентратором

Як видно з рис. 4, застосування ультразвукових концентраторів дозволяє на порядок збільшити чутливість перетворювача.

**Електроакустичні перетворювачі**

Електроакустичні перетворювачі (ЕАП) призначені для перетворення електричної напруги в акустичний сигнал і навпаки.

Електроакустичні перетворювачі широко застосовуються для роботи в повітряному середовищі

(системи охорони, вимірювальна техніка), у воді (локатори, ехолоти, підводний зв'язок тощо), для створення звукових хвиль в твердих тілах (неруйнівний контроль).

Відомі механічні, електродинамічні, магнітострикційні, електростатичні, п'єзоелектричні ЕАП [1]. В даний час найбільше застосування знайшли п'єзоелектричні перетворювачі.

Електроакустичний перетворювач являє собою електромеханічну коливальну систему з досить високою добротністю. Приєднання до такої системи механічних або електричних елементів дозволяє змінювати параметри перетворювача.

Електроакустичні перетворювачі можуть виконувати дві функції:

- звукова індикація моменту надходження або виконання команди (90-100 дБ);
- оповіщення аварійної або нештатної ситуації (120-130 дБ).

У першому випадку перетворювачі виготовляють на основі дискових біморфних елементів.

Для збільшення рівня звукового тиску можуть бути використані резонатори Гельмгольца, чвертьхвильові резонатори, а також додаткові електричні коливальні контури [7].

Одна з можливих конструкцій електроакустичного перетворювача з чвертьхвильовим резонатором і резонатором Гельмгольца і її вихідні характеристики показані на рис. 5, 6.

Як видно з рис. 6, застосування чвертьхвильових резонаторів дозволяє істотно збільшити рівень звукового тиску.

### Висновки

В роботі проведено огляд і аналіз можливостей проектування п'єзоелектричних перетворювачів для робо техніки. Розглянуто конструкції п'єзоелектричних датчиків дотику з мономорфним і біморфним п'єзоелектричними елементами. Застосування біморфної конструкції дозволяє збільшити чутливість датчиків дотику.

Розглянута конструкція п'єзоелектричного датчика сили з ультразвуковим концентратором. Застосування ультразвукових концентраторів дозволяє збільшити чутливість датчиків сили. Розглянута конструкція електроакустичного перетворювача з резонатором. Застосування резонаторів дозволяє збільшити звукову потужність вихідного сигналу електроакустичних перетворювачів.

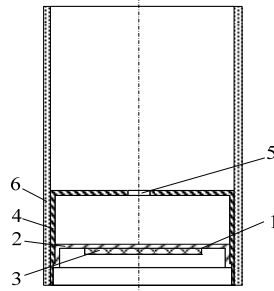


Рис. 5. Конструкція ЕАП: 1 – біморфний п'єзоелемент; 2 – металева мембрана; 3 – п'єзоелемент; 4 – корпус перетворювача; 5 – отвір; 6 – порожнистий циліндр

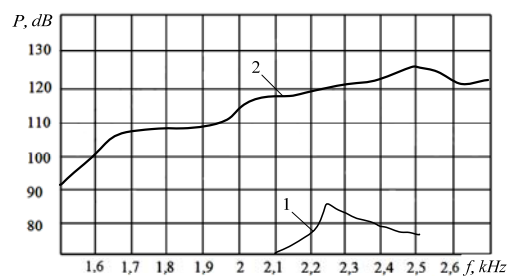


Рис. 6. Вихідна характеристика ЕАП: 1 – без резонатора; 2 – з резонатором

### Література

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. 498 p.
2. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Sharapov V., Sotula Zh., Kunitskaya L. Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013, 240 p.
4. Шарапов В.М. Электроакустические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, Л.Г. Куницкая. – М. : Техносфера, 2013. – 280 с.
5. Датчики / под ред. В.М. Шарапова. – М. : Техносфера, 2012. – 616 с.
6. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, К.В. Базило, Л.Г. Куницкая. – Черкасы : Вертикаль, 2010. – 278 с.
7. Базило К.В. Збудження коливань згину в циліндричних п'єзоелементах / К.В. Базило // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 182–184.

### References

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. 498 p.
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. P'ezoelektricheskie datchiki. Moscow, Texnosfera, 2006, 632 p.
3. Sharapov V., Sotula Zh., Kunitskaya L. Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013, 240 p.
4. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Kunitskaya L.G. E'lektroakusticheskie preobrazovateli. Moscow: Texnosfera, 2013, 280 p.
5. Datchiki / Pod red. V.M. Sharapova. Moscow, Texnosfera, 2012, 616 p.
6. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Bazilo K.V., Kunitskaya L.G. P'ezokeramicheskie transformatory I datchiki, Cherkasy', Vertikal', 2010, 278 p.
7. Bazilo K.V. Zbudzhennia kolyvan' zghynu v tsylindrychnykh piezoelementakh, *Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu, Technical sciences*, Khmelnytsky 2014, No. 5, pp. 182–184.

Рецензія/Peer review : 23.2.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор Палагін В.В.

УДК 535.08; 681.7.08

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев,

А.А. КОРОГОД

Киевский национальный университет технологий и дизайна

## ИЗБЫТОЧНАЯ ПИРОМЕТРИЯ: ИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Рассмотрен подход к решению задачи избыточных измерений температуры нагретых тел при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником. Описана сущность предложенного метода и технического решения цифрового пирометра отношения, его недостатки и достоинства. Показана возможность исключения влияния на результат измерений радиационной температуры постоянной Стефана – Больцмана. Работа представляет интерес для магистров, специалистов и ученых, интересующихся новыми методами измерения радиационной температуры.

Ключевые слова: радиационная пирометрия, методы избыточных измерений, температура, расплав стекломассы, функция преобразования, цифровой пирометр.

V.T. KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

A.O. KOROGOD

Kiev national university of technologies and design

## REDUNDANT PYROMETRY: REDUNDANT MEASUREMENTS OF RADIANT TEMPERATURE AT THE LOGARITHMIC FUNCTION OF TRANSFORMATION OF MEASURING CHANNEL

*Abstract — In the paper are noted by advantages of contactless optic-electronic methods of measurement of temperature in comparison with contact and the basic lacks. Importance of contactless temperature measurements on an example of formation processes of glass, glassmakings and manufactures of products from glass and a role of knowledge of dependence of viscosity from temperature in reception of products of high quality is shown. As an example typical dependence of viscosity on temperature is resulted. It is established, that for today there is enough of works and patents of Ukraine, describing methods of redundant measurements of radiating temperature and the technical decisions of radiating pyrometers representing a new scientific direction in fundamental metrology — redundant pyrometer. It is offered for contactless high-precision definition of temperature of the molten glass to use methods of redundant measurements of radiating temperature at logarithmic function of transformation of the measuring channel. Definition of the theory of redundant measurements of radiating temperature, subject of researches and structure is resulted. It is ascertained, that all methods of redundant measurements differ from methods of direct measurements by structure of mathematical model, a kind of the equations of redundant measurements and are described not by one, but system of mathematical models. Their structure and kind depend on a kind of function of transformation of the measuring channel, from number of the chosen numbers of the physical sizes which are subject to measuring transformation, and also from a kind of natural communications between the sizes of input quantities.*

*The problem of redundant measurements of the radiating temperature, concerning a category of measuring problems with attributed to object of measurements by the mathematical model described, in the considered case, the fundamental Stefan – Boltzmann law is considered. Feature given problems is definition of the actual value of physical quantities (temperature) of not directed action through measuring transformation of physical quantities of the directed action (— streams of optical radiation) thanks to existence of Stefan – Boltzmann law.*

*It is offered for drawing up of mathematical models and possibility of their decision to use numbers of input quantities, which are connected among themselves under the law of an arithmetic progression. Affirms, that use and other numbers of the input quantities connected among themselves definitely is possible. It is made and for the first time the mathematical model of process of redundant measurements of radiating temperature is described at logarithmic function of transformation of the measuring channel. For the first time the equations of redundant measurements and the equation of numerical values for definition of the actual value of temperature of object of researches and parameters of logarithmic function of transformation of the measuring channel, and also the power of the dark stream of optical radiation are deduced. It is established and shown, that the result of measurements of temperature does not depend on values of parameters of function of transformation of the measuring channel, the power of the dark stream, and also from values of operating ratio of a stream of optical radiation from object and the transmittance of optical radiation stream by a layer of atmosphere from object to radiometer.*

*Methods of redundant measurements provide increase of accuracy of measurements of radiating temperature and expansion from below and from above a range of measured values of temperatures at the expense of an exception of influence on result of measurements of the parameters characterizing quality of environment and current values of parameters of nonlinear function of transformation. Definition of parameters logarithmic ФП and their deviations from rating values during set calendar time of carrying out of measurements, give the chance to predict metrological reliability of the measuring apparatuses in present situations of time of its operation. Direct methods of measurements do not possess such possibilities.*

*The function chart of the digital pyrometer realising a method of redundant measurements of radiating temperature is resulted, and its work is described. It is ascertained, that the given technical decision provides high accuracy of measurements and wide functionality both on data processing, and on their representation to the user (operator). It is reached at the expense of use, except the optic-electronic channel and executive mechanisms, the microconverter, the electronic stabilizer of temperature of a photodetector, an operative memory, hours of real time, the multiplexer, digital printer device and the shaper of signals of management. Thanks to introduction of the microconverter and an operative memory there was possible a reduction of hardware expenses at the expense of an exception of external ADC and DAC and performance of great volume of calculations. Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested measurements of radiant temperature.*

*Keywords: pyrometry, methods of redundant measurements, radiant temperature, function of transformation.*

## Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию методов и средств бесконтактного измерения температуры. В их основу положено определение температуры по тепловому излучению объекта исследований.

Преимуществами бесконтактных оптико-электронных методов измерения температуры по сравнению с контактными являются [1]:

1) высокое быстродействие, определяемое типом приемника излучения и алгоритмом обработки электрических сигналов. При использовании фотодиодов и быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) постоянная времени может составлять  $(10^{-2} - 10^{-6})$  с ;

2) возможность измерения температуры движущихся объектов и элементов оборудования, в том числе находящихся под высоковольтным потенциалом;

3) отсутствие искажения температурного поля объекта исследований, что особенно актуально при измерении температуры материалов с низкой теплопроводностью (дерево, пластик и др.), а также риска повреждения поверхности и формы в случае мягких (пластичных) объектов;

4) возможность измерения высоких температур, при которых применение контактных средств измерения либо невозможно, либо время их работы очень невелико;

5) возможность работы в условиях повышенной радиации и температуры окружающей среды (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) при размещении приемной головки и самого пирометра с помощью оптоволоконного кабеля;

6) возможность измерения температуры без отключения объекта исследований от техпроцесса;

7) обеспечение безопасности персонала, измерение температуры до  $3000^{\circ}\text{C}$ .

К числу основных недостатков относятся: трудность полного учета связей между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией, изменение излучательной способности поверхности от длины волны в регистрируемом спектральном диапазоне и от температуры  $T_x$  в диапазоне измерений, наличие поглощения излучения в среде между пирометром и объектом исследований, а также геометрические параметры поля зрения.

К числу средств бесконтактного измерения температуры по тепловому излучению объекта относятся пирометры и тепловизоры. Пирометры, например, обеспечивают измерение температуры круговой зоны, ограниченной полем зрения прибора и ее усреднение в пределах данной зоны. При этом зона видимости пирометра зависит от расстояния до объекта и от оптического разрешения пирометра. Варьируя этими двумя параметрами можно с помощью пирометра измерять как температуру тонкой проволоки, так и среднюю температуру поверхности крупногабаритных объектов.

Тепловизоры обеспечивают определение значений температуры и преобразования их в визуальную картину распределения тепловых полей по поверхности объекта исследований. В результате получают обобщенную информацию в виде тепловой картины некоторой области и конкретное значение температуры интересующего объекта, размер которого равен или больше размера элементарной ячейки поля зрения тепловизора [1].

В связи с вышеизложенным, по-прежнему актуальной является задача борьбы с указанными выше недостатками бесконтактных методов измерений температуры и разработка новых методов и пирометров, обеспечивающие высокоточное измерение температуры труднодоступных объектов в широком диапазоне температур.

**Объект исследований** — процесс бесконтактного измерения температуры нагретых тел оптико-электронными методами.

**Предмет исследований** — избыточные измерения температуры нагретых тел при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником.

**Целью работы** является разработка метода избыточных измерений и оценка его возможностей при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником.

### Результаты исследований

Покажем важность бесконтактных температурных измерений на примере процессов стеклообразования, стекловарения и производства изделий из стекла и роль знания зависимости вязкости от температуры в получении изделий высокого качества.

Основным фактором, определяющим легкость стеклообразования в том или ином расплаве является зависимость вязкости от температуры (рис.1). Как утверждается в [2], легкость стеклообразования обеспечивается в двух случаях: а) если температуре плавления стекломассы в кристаллической фазе соответствует очень большое значение вязкости расплава; б) если при понижении температуры расплава значение вязкости очень быстро растет.

Знание значения вязкости важно также при определении условий плавления шихты, температуры отжига, необходимой для снятия внутренних напряжений, температурного интервала формирования промышленных изделий из стекла. От вязкости зависит верхнее граничное значение температуры эксплуатации стекла и условия, при которых может произойти девитрификация (спонтанная кристаллизация). Большое значение вязкости при температуре перехода шихты в стеклообразное состояние является причиной проявления вязкоупругих свойств и временной зависимости многих свойств расплава.

На рис. 1 приведены реперные точки температурной зависимости вязкости. Дадим им краткую

характеристику в соответствие с данными работы [2]. Точка начала деформации — это значение температуры, при которой напряжение снимается в течении нескольких часов. Она соответствует вязкости  $10^{13,5}$  Па·с. После формирования изделия возникшие внутренние напряжения устраняются в процессе отжига. Отжиг изделий осуществляется при температуре, для которой вязкость находится в пределах  $10^{12}$  Па·с –  $10^{12,4}$  Па·с, а сами напряжения устраняются в течение нескольких минут. При температуре  $T_g$  стекло обладает свойством твердого упругого тела с хрупким разрушением.

Промышленные методы изготовления высококачественных изделий из стекла требуют очень точного контроля значения вязкости во время его формования. Известно [2], что, например, точка размягчения содо-

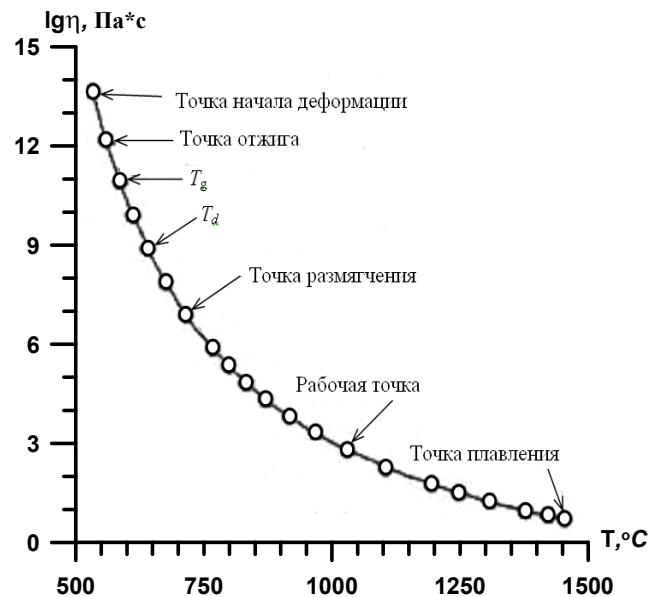


Рис.1. Типичная зависимость вязкости от температуры для содо-известково-силикатного расплава (NIST стандарт №710)

известково-силикатного расплава стекломассы соответствует вязкости  $10^{6,6}$  Па·с. Формование изделий машинным способом осуществляется при вязкости  $10^3$  Па·с, называемой рабочей точкой. Область температур между рабочей точкой и точкой размягчения называется рабочей областью. От ширины и значений температур рабочей области зависят и типы стекол (длинные или короткие стекла, твердые или мягкие), их характеристики.

Практической температурой плавления промышленных стекол называется та температура, для которой вязкость не превышает  $10^1$  Па·с и при которой за заданное время могут быть проведены процессы осветления и гомогенизации стекломассы. Несиликатные и неоксидные стекла плавятся и при более низких значениях вязкости.

Для определения вязкости стекломассы конкретного вида стекла предлагается использовать типовую температурную характеристику.

В узком диапазоне температур вязкость определяется согласно уравнения величин [3]:

$$\ln \eta_x = S_0 \left( k_1 + \frac{B_{ст}}{S_0 T_x} \right),$$

где  $S_0$  и  $B_{ст}$  — некоторые постоянные величины, зависящие от вида стекла,  $k_1 = 1$ .

Зная  $S_0$  и  $B_{ст}$  для конкретного вида стекла, не трудно определить и вязкость расплава стекломассы по значению его температуры.

Для бесконтактного высокоточного определения температуры расплава стекломассы предлагается использовать методы избыточных измерений [4 – 19], которые представляет собой новое научное направление в фундаментальной метрологии — избыточную пирометрию [20].

Следуя [19], можно утверждать, что теория избыточных измерений радиационной температуры — это система частных законов, принципов, методов, математических моделей, положений и условий, характеризующая новую стратегию измерений радиационной температуры при нелинейной и нестабильной функции преобразования сенсора или измерительного канала в целом, предлагающая новые пути линейного и нелинейного измерительного преобразования потоков оптического излучения от нагретых тел и предсказывающая достижимые результаты по точности, чувствительности, быстродействию и метрологической надежности.

Предметом исследований теории избыточных измерений радиационной температуры является: познание собственных законов строения, функционирования и развития; новая стратегия избыточных измерений радиационной температуры, ее приращений, зависимостей и характеристик, а также характеристик метрологической надежности микропроцессорных пирометров с неизвестными, в общем случае, и нестабильными параметрами нелинейной функции преобразования измерительного канала, направленная на получение нового качества измерений и знаний о текущем состоянии измерительного канала, а также на развитие и становление избыточной пирометрии и соответствующей эталонной базы, развитие сенсоров и биосенсоров для определения радиационной температуры.

Сердцевину теории избыточных измерений радиационной температуры составляют входящие в нее частные законы развития. Категории образуют каркас теории. Научные принципы, как основные исходные положения, составляют фундамент теории.

На сегодняшний день существует достаточное количество работ и патентов Украины, описывающие методы избыточных измерений радиационной температуры и технические решения радиационных пирометров [5 – 20].

Ниже рассматривается задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, в данном случае, законом Стефана – Больцмана [21]:

$$\Phi_x = A'\sigma T_x^4, \tag{1}$$

где  $A' = A\tau_{\lambda_c}$ ;  $A$  — коэффициент использования потока оптического излучения от объекта;  $\tau_{\lambda_c}$  — коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы на длине волны  $\lambda_c$ ;  $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4]$  — постоянная Стефана – Больцмана;  $T_x \text{ [К]}$  — измеряемая температура.

Особенностью данной задач является определение действительного значения физической величины (температуры) ненаправленного действия через измерительное преобразование физических величины направленного действия (— потоков оптического излучения) благодаря существованию фундаментального закона (1).

Бесконтактные измерения температуры нагретых тел с использованием методов избыточных измерений (МИИ) 1-го рода является весьма перспективным, поскольку обеспечивают автоматическое исключение систематических составляющих погрешности результата измерений, вызванных влиянием на него абсолютных значений параметров функции преобразования (ФП) измерительного канала и их отклонения от номинальных значений. При наличии случайных помех и наводок используются методы избыточных измерений II-го и III-го родов [22].

Все МИИ отличаются от методов прямых измерений структурой математической модели и видом уравнений избыточных измерений. МИИ описываются не одной, а системой математических моделей. Как будет показано ниже, их структура и вид зависят от вида ФП измерительного канала, от числа выбранных рядов физических величин, подлежащих измерительному преобразованию, а также от вида закономерных связей между размерами входных величин.

Предположим, что в качестве фотоприемника используется фотодиод ФД 307. Известно, что функция преобразования фотодиода, работающего в фотодиодном режиме, описывается следующим уравнением величин

$$U'_{\text{нх}} = k'_{\text{ус}} \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{S_I \Phi_x}{I_T} + k_1 \right) + \Delta U' = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Phi_x}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \tag{2}$$

где  $U'_{\text{нх}}$  — выходное напряжение измерительного канала;  $k'_{\text{ус}}$  — коэффициент усиления усилителя с фото-диодом;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура (293 К);  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона;  $S_I$  — токовая чувствительность фотодиода;  $\Phi_x$  — мощность потока оптического излучения, падающего на фотодиод;  $I_T$  — темновой ток фотодиода;  $k_1 = 1$ ;  $S'_\text{н} = k'_{\text{ус}} kT/q$  — крутизна преобразования, зависящая как от коэффициента усиления усилителя и его отклонения от номинального значения, так и от абсолютной температуры;  $S'_\text{н} = S_\text{н}(1 + \gamma_\text{н})$ ;  $\Phi_T = I_T / S_I$  — мощность темнового потока;  $U'$  — смещение логарифмической функции преобразования с учетом дрейфа нуля ( $U' = U'_{\text{см}} + \Delta_{\text{др}}$ ).

Для составления математических моделей и возможности их решения предложено использовать следующие ряды входных величин  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  и  $\Phi_5$ , из которых размеры второй и третьей, четвертой и пятой связаны между собой по закону арифметической прогрессии. При этом имеет место следующие равенства размеров:  $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$ ,  $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$ . Возможно использование рядов входных величин, размеры которых связаны между собой по закону геометрической прогрессии или комбинированного типа.

В данном случае система нелинейных уравнений величин, описывающая состояние измерительного канала в дискретные моменты времени измерительного преобразования мощностей пяти потоков оптического излучения  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  и  $\Phi_5$ , примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_{\text{н1}} = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н3}} = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Phi_0 + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н5}} = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Phi_x + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \\ U'_{\text{н2}} = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н4}} = S'_\text{н} \ln \left( \frac{\Phi_x}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

где  $U'_{\text{нi}}$  — выходное напряжение измерительного канала;  $\Phi_0$  и  $\Delta\Phi$  — нормированные по значению мощности потоки оптического излучения, [Вт];  $\Delta U' \text{ [В]}$  — смещение ФП с учетом аддитивной составляющей погрешности измерительного преобразования потоков оптического излучения (дрейфа нуля).



Выведем базовое уравнение избыточных измерений мощности потока оптического излучения  $\Phi_x$ . Для этого вычтем правые и левые равенства для напряжений  $U_5$  и  $U_4$  системы (3):

$$U'_5 - U'_4 = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_x + \Phi_T + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} \frac{\Phi_T}{\Phi_x + \Phi_T}}{\Phi_T} = S'_H \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right), \quad (4)$$

Решая (4) относительно  $S'_H$ , получим уравнение избыточных измерений крутизны преобразования через мощности искомого и нормированного по значению потоков оптического излучения  $\Phi_x$  и  $\Delta\Phi_0$  в виде:

$$S'_H = \frac{U'_5 - U'_4}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (5)$$

Определим разность правых и левых частей равенств для напряжений  $U_3$  и  $U_2$  системы (3):

$$U'_3 - U'_2 = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_0 + \Phi_T + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} \frac{\Phi_T}{\Phi_0 + \Phi_T}}{\Phi_T} = S'_H \ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]. \quad (6)$$

Из равенства (6) получим уравнение избыточных измерений крутизны преобразования, выраженное через мощности двух нормированных по значению потоков оптического излучения  $\Phi_0$  и  $\Delta\Phi_0$  в виде:

$$S'_H = \frac{U'_3 - U'_2}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (7)$$

Приравняем уравнения избыточных измерений параметра  $S'_H$  (5) и (7) и получим базовое уравнение избыточных измерений в неявном виде:

$$\frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} = \frac{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right]}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (8)$$

Поскольку уравнение избыточных измерений (8) получено в неявном виде, то их решение осуществляется путем перебора с заданным шагом всех дискретных значений мощностей искомого потока оптического излучения  $\Phi_x$ , т.е. методом итераций.

В явном виде уравнение избыточных измерений мощности искомого потока оптического излучения получается более громоздким. Действительно, если осуществить потенцирование аналитического выражения (8) и решить полученное равенство относительно  $\Phi_x$ , то получим уравнение избыточных измерений в виде:

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0 - \Phi_T \left[ \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}{\left[ \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}. \quad (9)$$

Для практических расчетов целесообразно использовать уравнение избыточных измерений (8).

В (8) и (9) неизвестной величиной является мощность темнового потока оптического излучения  $\Phi_T$ . Для ее определения найдем разности левых и правых частей равенств напряжений  $U_2$  и  $U_1$  системы (3):

$$U'_2 - U'_1 = S'_H \left[ \ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T} \right]. \quad (10)$$

С учетом (7), получим уравнение избыточных измерений мощности темнового потока оптического излучения (при известных значениях мощностей потоков оптического излучения  $\Phi_0$  и  $\Delta\Phi_0$  и результатах измерительного преобразования первых трех физических величин) в виде:

$$\frac{U'_2 - U'_1}{U'_3 - U'_2} = \frac{\ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}}{\ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)}. \quad (11)$$

Определив значение мощности потока оптического излучения по уравнению избыточных измерений (11), не трудно определить действительное значение мощности искомого потока оптического излучения  $\Phi_x$  по уравнению избыточных измерений (8) или (9) и значения крутизны преобразования как по уравнению избыточных измерений (7), так и по уравнению избыточных измерений (5).

Поскольку уравнение избыточных измерений мощности темного потока оптического излучения (11) получают только в неявном виде, то его решение проводится методом итерации, т.е. путем перебора с заданным шагом всех возможных дискретных значений мощности темного потока оптического излучения  $\Phi_T$ .

Из полученных аналитических выражений (8), (9) и (12) видно, что результаты избыточных измерений мощностей искомого и темного потоков оптического излучения не зависят от параметров логарифмической функции преобразования (абсолютной температуры, заряда электрона, постоянной Больцмана, темновото тока и токовой чувствительности, коэффициента усиления усилителя с линейной функцией преобразования и нестабильности ее параметров).

Смещение логарифмической функции преобразования определяется по результатам измерительного преобразования первой и второй физических величин, т.е. при решении, например, первого или второго нелинейных уравнения величин системы (3) относительно  $\Delta U'$ . В результате, с учетом (7), получаем:

$$\Delta U' = U'_1 - S'_H \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) = U'_1 - (U'_3 - U'_2) \frac{\ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right)}{\ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)} \quad (12)$$

или

$$\Delta U' = U'_2 - S'_H \ln \left( \frac{\Phi_0}{\Phi_T} + 1 \right) = U'_2 - (U'_3 - U'_2) \frac{\ln \left( \frac{\Phi_0}{\Phi_T} + 1 \right)}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (13)$$

Согласно (1), температура объекта исследований, например, расплава стекломассы может быть определена из закона Стефана – Больцмана как

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}}, \quad (14)$$

при условии, что известны коэффициент использования потока оптического излучения от объекта исследований и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра. Для исключения влияния этих параметров на результат измерения температуры используют нагретое тело или участок расплава стекломассы, температура  $T_0$  которого известна с наперед заданной точностью. Достижение расплавом температуры  $T_0$  определяется, например, и по реперным точкам температурной кривой вязкости стекломассы при использовании вискозиметра или датчика температуры разового действия.

В момент появления сигнала о достижении температуры расплава значения  $T_0$ , осуществляется измерение мощности потока оптического излучения  $\Phi_{01}$  описанным методом избыточных измерений. В этом случае система нелинейных уравнений величин примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U''_{H1} &= S''_H \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H3} = S''_H \ln \left( \frac{\Phi_0 + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H5} = S''_H \ln \left( \frac{\Phi_{01} + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \\ U''_{H2} &= S''_H \ln \left( \frac{\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H4} = S''_H \ln \left( \frac{\Phi_{01}}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где  $U''_{Hi}$  — выходное напряжение измерительного канала при новых измерительных преобразованиях входных величин;  $S''_H$  — измененная по значению крутизна преобразования;  $\Delta U''$  — измененное по значению смещение ФП.

В результате решения системы нелинейных уравнений величин (15) получают следующие уравнения избыточных измерений:

$$S''_H = \frac{U''_5 - U''_4}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_{01} + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (16)$$

$$S_H'' = \frac{U_3'' - U_2''}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (17)$$

$$\frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} = \frac{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_{01} + \Phi_T} + k_1 \right]}{\ln \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (18)$$

где значение темнового тока определяется согласно уравнению избыточных измерений, полученному в неявном виде:

$$\frac{U_2'' - U_1''}{U_3'' - U_2''} = \frac{\ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}}{\ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)}. \quad (19)$$

В явном виде уравнение избыточных измерений мощности потока оптического излучения  $\Phi_{01}$  имеет вид, аналогичный (9):

$$\Phi_{01} = \frac{\Delta\Phi_0 - \Phi_T \left[ \frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}{\left[ \frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} \ln \left( \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]} \quad (20)$$

Определив мощность потока оптического излучения  $\Phi_{01}$ , соответствующее известной по значению температуре  $T_0$ , при тех же условиях (значениях коэффициентов) использования потока оптического излучения от объекта и его пропускания слоем атмосферы от объекта до радиометра, окончательно получаем результат избыточных измерений температуры по уравнению измерений

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}} = T_{01} \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}}. \quad (21)$$

При необходимости можно определить обобщенный показатель качества (оптической прозрачности) воздушной среды между объектом исследований и пирометром

$$A' = \Phi_{01} / \sigma T_0^4. \quad (22)$$

На основании полученных уравнений избыточных измерений, можно констатировать, что методы избыточных измерений обеспечивают повышение точности измерений радиационной температуры и расширение снизу и сверху диапазона измеряемых значений температур за счет исключения влияния на результат измерения параметров, характеризующих качество окружающей среды, и текущих значений параметров нелинейной функции преобразования. Определение параметров логарифмической ФП и отклонений их от номинальных значений в течение заданного календарного времени проведения измерений, дают возможность прогнозировать метрологическую надежность средств измерений, реализующих МИИ, в текущие моменты времени его эксплуатации [23 – 25]. Прямые методы измерений такими возможностями не обладают.

Таким образом, описанный метод избыточных измерений обеспечивает высокоточное определение не только действительного значения температуры, но и значений параметров логарифмической функции преобразования фотоприемника, а также обобщенный показатель оптической прозрачности воздушной среды между объектом исследований и пирометром согласно приведенным уравнениям измерений.

Рассмотрим один из вариантов технической реализации описанного метода избыточных измерений на примере функциональной схемы цифрового пирометра, приведенной на рис. 2.

На рис. 2 приведена функциональная схема цифрового пирометра спектрального отношения, где введены следующие условные обозначения: СО1 и СО2 — первый и второй стеклянные объективы, ФЗ — фотозатвор, прерывающий поток оптического излучения, ППП — полупрозрачная пластина, ЗПД — зеркальная полевая диафрагма, ОЗ — отражательное зеркало, ПС — поглощающее стекло с визиром, ОД — obtюраторный диск, МДв — микродвигатель, АД — апертурная диафрагма, СП — сеточный поглотитель из нейтрального стекла, ФЛ — фокусирующая линза, СФ — составной светофильтр с заданными граничными длинами волн полос пропускания:  $\Delta\lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$ ; ФП — фотоприемник, ЭСТ — электронный стабилизатор температуры фотоприемника, ИИ — источник излучения, СИД — светоизлучающий диод, ФФС — фотоприемник-формирователь синхроимпульсов, СД — синхронный детектор, МК — микроконвертор с клавиатурой, ЖКИ — жидкокристаллический индикатор, УМ — усилитель мощности; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь, РЧ — регистр числа, ИМИ — источник монохроматического излучения, ПКП1 и ПКП2 — первый и второй преобразователи «код-перемещение», ОШ — общая шина.

Работа цифрового пирометра, функциональная схема которого приведена на рис. 2, состоит в следующем. В память МК записывается программа выполнения заданной последовательности операций.

Эта программа обеспечивает функционирование цифрового пирометра как единого программно-технического средства измерения, а также обработку результатов промежуточных измерений по априори установленным уравнениям числовых значений.

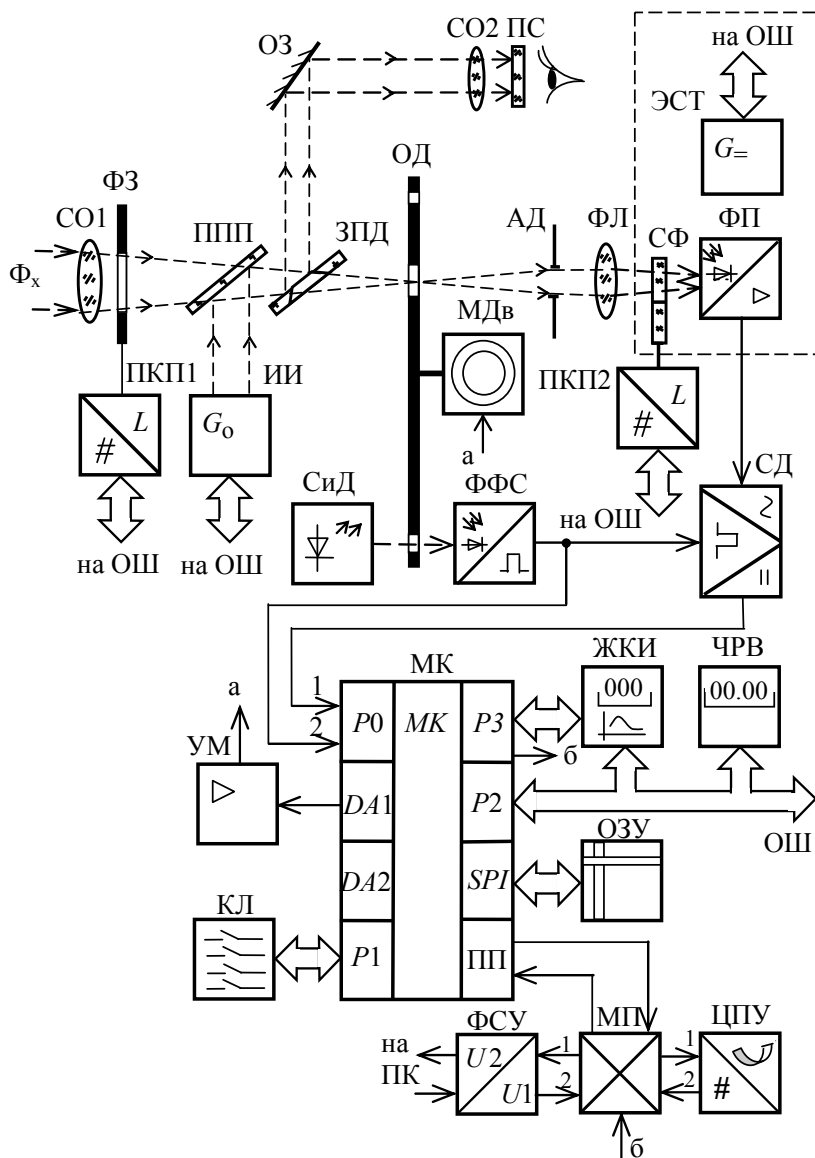


Рис. 2. Функциональная схема цифрового пирометра

После включения питания цифрового пирометра по команде с микроконвертора МК все функциональные блоки устанавливаются в исходное состояние. На экране ЖКИ какие-либо данные отсутствуют. Фотозатвор ФЗ находится в закрытом или открытом состоянии, при котором модулированные по амплитуде потоки оптического излучения  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  и  $\Phi_5$  поочередно поступают через оптический канал на вход фотоприемника ФП.

Необходимо отметить, что модуляция потока оптического излучения осуществляется с помощью обтюраторного диска ОД, вращаемого микродвигателем МДв постоянного тока. Управление микродвигателем МДв выполняется путем подачи на его управляющий вход постоянного напряжения с выхода порта DA1, усиленного с помощью усилителя мощности УМ. Отметим, что выхода порта DA1 является выходом встроенного в МК цифроаналогового преобразователя. Модулированный поток оптического излучения с помощью фотоприемника ФП преобразуется в переменное напряжение низкой частоты (1 – 10 кГц). Последняя поддерживается стабильной во времени благодаря наличию сигнала обратной связи с выхода фотоприемника-формирователя синхроимпульсов ФФС на второй вход порта P0 МК. Этот сигнал получают путем подачи на ФФС потока оптического излучения с выхода светоизлучающего диода СИД и формирования последовательности нормированных по амплитуде и длительности импульсов, которые и представляют собой сигнал обратной связи. В случае изменения частоты вращения, выходное напряжение порта DA1 изменяется таким образом, чтобы установить заданное номинальное значение частоты вращения обтюраторного диска. Стабилизация частоты вращения обтюраторного диска обеспечивает повышение точности формирования и аналого-цифрового преобразования выходного сигнала синхронного детектора СД.

Выходной сигнал ФФС одновременно является и сигналом управления работой синхронного детектора СД.

Перед началом измерения с помощью объективов СО1 и СО2 цифровой пирометр направляется на нагретый объект исследования. По команде с микроконвертора МК на первый преобразователь «код-перемещение» ПКП1 через ОШ подается цифровой код, при котором фотозатвор ФЗ открывается. Поток оптического излучения от исследуемого объекта через первый стеклянный объектив СО1, фотозатвор ФЗ, полупрозрачную пластину ППП попадает на зеркальную полевую диафрагму ЗПД. Отбившись от нее, указанный поток через отражательное зеркало ОЗ, второй стеклянный объектив СО2 и поглощающее стекло ПС с визиром поступает в глаза наблюдателя. После наведения на исследуемый объект, цифровой пирометр готов к измерению.

После нажатия кнопки «Пуск» на клавиатуре Кл, на МК поступает сигнал начала измерений. По команде с МК, поступающей через общую шину ОШ на вход второго преобразователя «код-перемещение» ПКП2, составной светофильтр СФ устанавливается в положение, указанное на рис. 2, при котором выделяется спектр оптического сигнала в области длин волн  $\Delta\lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_1$ .

Весь процесс определения действительного значения температуры состоит из нескольких тактов измерительного преобразования разных по значению мощности потоков оптического излучения и тактов обработки полученных результатов.

*В первом такте* по команде с микроконвертора МК фотозатвор ФЗ закрывается, тем самым запрещается прохождение потока оптического излучения  $\Phi_x$  от объекта исследований на фотоприемник ФП.

На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения  $\Phi_1$  с заданными параметрами.

Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения  $\Phi_1$  ( $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$ ) проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП формируется переменный сигнал малого уровня, который усиливается в заданное число раз и детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение  $U'_{н1}$  (3).

Полученное постоянное напряжение  $U'_{н1}$  поступает на вход «1» порта РО микроконвертора МК, который является входом встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (см. рис. 2). В результате осуществляется аналого-цифровое преобразование постоянного напряжения  $U'_{н1}$  в код числа  $N_1 = S_0 U'_{н1}$ , где  $S_0$  — крутизна встроенного аналого-цифрового преобразователя. Затем код числа  $N_1$  записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

*Во втором такте* на управляющий вход источника оптического излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения  $\Phi_2$  ( $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$ ) с заданными параметрами. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения  $\Phi_2$  также проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. Выходной сигнал переменного тока с выхода фотоприемника ФП поступает на вход синхронного детектора СД и детектируется. На выходе синхронного детектора СД формируется напряжение  $U'_{н2}$  (3).

Полученное постоянное напряжение  $U'_{н2}$  поступает на вход «1» порта РО МК. В результате осуществляется аналого-цифровое преобразование напряжения  $U'_{н2}$  в код числа  $N_2 = S_0 U'_{н2}$ , который записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

*В третьем такте* на управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения  $\Phi_3$  ( $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$ ) с заданными параметрами. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения  $\Phi_2$  проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП переменный сигнал усиливается, а затем детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение  $U'_{н3}$  (3).

Полученное постоянное напряжение  $U'_{н3}$  поступает на вход «1» порта РО МК и преобразуется в код числа  $N_3 = S_0 U'_{н3}$ . Последний записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

*В четвертом такте* по команде с микроконвертора МК фотозатвор ФЗ открывается. Этим самым разрешается прохождение потока оптического излучения  $\Phi_x$  от объекта исследований на фотоприемник ФП.

На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ поток оптического излучения отсутствует. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток

оптического излучения  $\Phi_4$  ( $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$ ) от объекта исследований проходит через стеклянный объектив СО1, фотозатвор ФЗ, полупрозрачную пластину ППП, зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтураторного диска АД, апертурную диафрагму ФД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП данный поток преобразуется в переменное напряжение, усиливается и детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе СД формируется напряжение  $U'_{н4}$  (3), которое поступает на вход «1» порта РО МК. В результате аналого-цифрового преобразования постоянного напряжения  $U'_{н4}$  в код числа  $N_4 = S_0 U'_{н4}$ . Код числа  $N_4$  записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

В пятом такте по команде с микроконвертора МК на фотозатвор ФЗ поступает тот же сигнал, что и в предыдущем такте, т.е. ФЗ остается открытым. На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения  $\Phi_1$  ( $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$ ). Последний, отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, одновременно с потоком оптического излучения  $\Phi_x$  от объекта исследований поступает на зеркальную полевую диафрагму ЗПД, где потоки суммируются. Суммарный поток оптического излучения  $\Phi_5$  ( $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$ ) проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтураторного диска АД, апертурную диафрагму ФД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и также поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. Выходной сигнал фотоприемника ФП детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение  $U'_{н5}$  (3).

Полученное постоянное напряжение  $U'_{н5}$  поступает на вход «1» порта РО МК. В результате постоянное напряжение  $U'_{н5}$  преобразуется в код числа  $N_5 = S_0 U'_{н5}$ , который записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

По полученным данным определяется крутизна преобразования по уравнению числовых значений

$$N_{S'н} = \frac{N_3 - N_2}{\ln \left[ \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}, \tag{23}$$

действительное значение мощности потока оптического излучения от объекта исследований —

$$N_{\Phi_x} = \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[ \frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[ \frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}. \tag{24}$$

действительное значение смещения функции преобразования по уравнениям числовых значений:

$$\Delta N = N_1 - (N_3 - N_2) \frac{\ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_T\}} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right)} \tag{25}$$

или

$$\Delta N = N_2 - (N_3 - N_2) \frac{\ln \left( \frac{\{\Phi_0\}}{\{\Phi_T\}} + 1 \right)}{\ln \left[ \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}, \tag{26}$$

где мощность  $\{\Phi_T\}$  темнового потока оптического излучения определяется по уравнению числовых значений, полученному в неявном виде:

$$\frac{N_2 - N_1}{N_3 - N_2} = \frac{\ln \frac{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}}{\{\Delta\Phi_0\} + \{\Phi_T\}}}{\ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right)}. \tag{27}$$

С некоторой погрешностью температуру объекта исследований можно определить из закона Стефана – Больцмана как  $N_{Tx} = \sqrt[4]{N_{\Phi_x} / A' \sigma}$ , если известны коэффициент использования потока оптического излучения от объекта и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра.

В противном случае аналогичным образом проводятся избыточные измерения нормированной по значению температуры  $T_0$ , заданной с наперед заданной точностью. Практически на объекте исследований или в непосредственной близости от него всегда может быть найдена область с температурой  $T_0 = \text{const}$  в

спектральном диапазоне длин волн  $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$ . В качестве нормированной по значению температуры  $T_0$  может быть использована и реперная точка кривой вязкости стекломассы, определяемая с помощью, например, вискозиметра или датчика температуры разового действия, сигнал от которого разрешает в этот момент времени измерительное преобразование температуры  $T_0$  в код числа  $N_0$ .

Во втором цикле измерений вместо пяти тактов измерительного преобразования мощности потоков оптического излучения  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi'_4 (\{\Phi'_4\} = \{\Phi_{01}\})$  и  $\Phi'_5 (\{\Phi'_5\} = (\{\Phi_{01}\} + \{\Delta\Phi_0\}))$ , где  $\Phi_{01}$  — поток оптического излучения от объекта исследований или его части, соответствующий температуре  $T_0$ , проводятся только такты измерительного преобразования потоков оптического излучения  $\Phi'_4$  и  $\Phi'_5$  в напряжения. При этом, по команде с МК, поступающей на вход ПКП2, составной светофильтр СФ устанавливается в положение, противоположное указанному на рис. 2, при котором на вход фотоприемника поступает оптический сигнал в спектральном диапазоне длин волн  $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$ . В результате измерительного преобразования потоков оптического излучения  $\Phi'_4$  и  $\Phi'_5$  два напряжения —  $U''_{H4}$  и  $U''_{H5}$ , а затем и соответствующие им коды чисел:

$$N''_4 = S_0 U''_{H4} = S_0 \left[ S'_H \ln \left( \frac{\Phi_{01}}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U' \right] \quad (28)$$

и

$$N''_5 = S_0 U''_{H5} = S_0 \left[ S'_H \ln \left( \frac{\Phi_{01} + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U' \right]. \quad (29)$$

По окончании этих тактов осуществляется обработка полученных результатов измерительного преобразования согласно уравнению числовых значений:

$$N_{\Phi_{01}} = \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[ \frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - k_1 \right]}{\left[ \frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}, \quad (30)$$

где действительное значение мощности  $\{\Phi_T\}$  темнового потока определяется по уравнению числовых значений (27).

Из аналитического выражения закона Стефана – Больцмана определим постоянную  $A' = N_{\Phi_{01}} / \sigma N_{Tx}^4$ , где действительное значение  $N_{\Phi_{01}}$  (31) мощности потока оптического излучения, соответствующая температуре  $T_0$ , получено при дополнительном проведении двух тактов измерительного преобразования входных величин  $\Phi'_4$  и  $\Phi'_5$ . Зная коэффициент использования потока оптического излучения от объекта и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра, окончательно получим, что действительное значение температуры объекта исследований равно:

$$N_{Tx} = N_{T01} \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}} = \sqrt[4]{\frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[ \frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[ \frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]} \bigg/ \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[ \frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[ \frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left( \frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}}}. \quad (32)$$

Если нет необходимости определять значения смещения логарифмической функции преобразования, то, как видно из (32), действительное значение температуры объекта исследований определяется за шесть тактов измерительного преобразования потоков оптического излучения и одного такта обработки полученных результатов.

Полученные результаты избыточных измерений температуры и параметров логарифмической функции преобразования измерительного канала цифрового пирометра заносятся в ОЗУ. По команде с микроконвертора МК они отображаются на жидкокристаллической индикаторе ЖКИ в виде структурированных числовых данных или в виде графика изменения температуры во времени, распечатываются в виде карты знаний с помощью ЦПУ и, по необходимости, передаются в центральный компьютер с помощью формирователя сигналов управления ФСУ (см. рис. 2). Последний подключен через мультиплексор МП к последовательному порту ПП микроконвертора МК. Отображение результатов измерения температуры в виде графика изменения температуры во времени стало возможным благодаря использованию часов реального времени ЧРВ (см. рис. 2). Включение и выключение цифрового пирометра и ручной ввод-вывод данных осуществляется с помощью клавиатуры Кл.

Если изменить программу таким образом, чтобы в первом такте осуществлялось измерительное преобразование потока оптического излучения нулевой мощности (при закрытом фотозатворе и выключенном источнике оптического излучения), то реализуется метод избыточных измерений, описанный в патенте Украины № 79192 [17].

Таким образом, описанный цифровой пирометр, реализующий метод избыточных измерений радиационной температуры, не сложен в реализации, обеспечивает высокую точность измерений и имеет

широкие функциональные возможности как по обработке полученных данных, так и по их представлению пользователю (оператору). Это достигается за счет использования, кроме оптико-электронного канала и исполнительных механизмов, микро-конвертора, электронного стабилизатора температуры фотоприемника, оперативного запоминающего устройства, часов реального времени, мультиплексора, цифровпечатывающего устройства и формирователя сигналов управления.

Благодаря введению микроконвертора и оперативного запоминающего устройства стало возможным выполнение большого объема вычислений и уменьшение аппаратных затрат за счет исключения внешних аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей.

### Выводы

Отмечены преимуществами и основные недостатки бесконтактных оптико-электронных методов измерения температуры по сравнению с контактными.

Показана важность бесконтактных температурных измерений на примере процессов стеклообразования, стекловарения и производства изделий из стекла и роль знания зависимости вязкости от температуры в получении изделий высокого качества. В качестве примера приведена типичная зависимость вязкости от температуры для содо-известково-силикатного расплава (NIST стандарт №710).

Установлено, что на сегодняшний день существует достаточное количество работ и патентов Украины, описывающих методы избыточных измерений радиационной температуры и технические решения радиационных пирометров, и представляющих собой новое научное направление в фундаментальной метрологии — избыточную пирометрию.

Предлагается для бесконтактного высокоточного определения температуры расплава стекломассы в широком динамическом диапазоне использовать методы избыточных измерений радиационной температуры при логарифмической функции преобразования измерительного канала.

Приведено определение понятия теории избыточных измерений радиационной температуры, предмет исследований и структура.

Констатируется, что все методы избыточных измерений отличаются от методов прямых измерений структурой математической модели, видом уравнений избыточных измерений и описываются не одной, а системой математических моделей. Их структура и вид зависят от вида функции преобразования измерительного канала, от числа выбранных рядов физических величин, подлежащих измерительному преобразованию, а также от вида закономерных связей между размерами входных величин.

Рассмотрена задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, в рассматриваемом случае, фундаментальным законом Стефана – Больцмана. Особенностью данной задачи является определение действительного значения физической величины (температуры) ненаправленного действия через измерительное преобразование физических величины направленного действия (— поток оптического излучения) благодаря использованию закона Стефана – Больцмана.

Предложено для составления математических моделей и возможности их решения использовать ряды входных величин  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  и  $\Phi_5$ , которые связаны между собой по закону арифметической прогрессии. При этом  $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$ ,  $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$ ,  $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$ . Утверждается, что возможно использование и иных рядов входных величин, размеры которых связанных между собой определенным образом.

Составлена и впервые описана математическая модель процесса избыточных измерений радиационной температуры при использовании рядов входных величин  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  и  $\Phi_5$  при логарифмической функции преобразования измерительного канала.

Впервые выведены уравнения избыточных измерений и уравнения числовых значений для определения действительного значения температуры объекта исследований и параметров логарифмической функции преобразования измерительного канала, а также мощности темного потока оптического излучения.

Установлено и показано, что результат измерений температуры не зависит от значений параметров функции преобразования измерительного канала, мощности темного потока, а также от значений коэффициента использования потока оптического излучения от объекта и коэффициента пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра.

Методы избыточных измерений обеспечивают повышение точности измерений радиационной температуры и расширение снизу и сверху диапазона измеряемых значений температур за счет исключения влияния на результат измерений параметров, характеризующих качество окружающей среды и текущих значений параметров нелинейной функции преобразования. Определение параметров логарифмической ФП и отклонений их от номинальных значений в течение заданного календарного времени проведения измерений, дают возможность прогнозировать метрологическую надежность средств измерений, реализующих МИИ, в текущие моменты времени их эксплуатации. Прямые методы измерений такими возможностями не обладают.

Приведена функциональная схема цифрового радиационного пирометра отношения, реализующего метод избыточных измерений радиационной температуры, описана его работа.

Констатируется, что данное техническое решение обеспечивает высокую точность измерений и широкие функциональные возможности как по обработке полученных данных, так и по их представлению пользователю (оператору). Это достигается за счет использования, кроме оптико-электронного канала и



исполнительных механизмов, микроконвертора, электронного стабилизатора температуры фотоприемника, оперативного запоминающего устройства, часов реального времени, мультиплексора, цифроречеающего устройства и формирователя сигналов управления. Благодаря введению микроконвертора и оперативного запоминающего устройства стало возможным уменьшение аппаратурных затрат за счет исключения внешних аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей и выполнение большого объема вычислений.

### Литература

1. Неделько А.Ю. Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lityo.com.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8/1949-preimushchestva-i-nedostatki-beskontaktnogo-izmereniya-temperatury>.
2. Бородулина Е. Структура, свойства и технология стекла. Вязкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lenaborodulina.livejournal.com/13759.html>.
3. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya\\_proizvodstva\\_opticheskikh\\_volokon.pdf](http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya_proizvodstva_opticheskikh_volokon.pdf).
4. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах . – 2005. – № 1. – С. 7-24.
5. Кондратов В.Т. Проблемы измерения температуры объектов экосистемы /В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина // Материалы международной научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных мегаполисов», Донецк – Авдеевка, 01-04 июня 2004. – Донецк. ДонНТУ. – С. 499-505.
6. Кондратов В.Т. О создании пирометров отношения с автоматической коррекцией погрешностей / В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. Луганськ. – 2005. – С. 123-127.
7. Kondratov V.T., Zarnitsyna A.A., Serdyuk N.M. Digital optical pyrometer with automatic correction of systematic errors. Journal of Automation and Information Sciences. 2003. Pp. 137 – 142 (Scopus search results: 15122747200).
8. Деклараци́нный патент 56614 А. Україна, МПК G01R7/00. Спосіб визначення дійсного значення температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2002076364 ; заявл. 30.07.2002 ; опубл. 15.05.2003, – Бюл. № 5. – 14 с.
9. Деклараци́нный патент 66299 А. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, О.П. Рябов. – № 2003109797 ; заявлено 31.10.2003, опубл. 15.04.2004. Бюл. № 4. – 16 с.
10. Деклараци́нный патент 55947, Україна. МПК G01J5/08, G01K7/00. Оптичний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № 2002076365 ; заявл. 30.07.2002 ; опубл. 15.05.2003 ; № Бюл. № 4. – 7 с.
11. Деклараци́нный патент № 68026 А, Україна. МПК G01J1/10, G01K7/00. Спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2003088013 ; заявл. 27.08.2003 ; опубл. 15.07.2004 ; Бюл. №7. – 9 с.
12. Деклараци́нный патент № 66084 А, Україна. МПК G01J5/20. Радіаційний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2003076909 ; заявл. 22.07.2003 ; опубл. 15.04.2004 ; Бюл. №4. – 6 с.
13. Пат. 73426. Україна. МПК G01J5/08. Пірометр спектрального відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № 20031212097 ; заявл. 23.12.2003 ; опубл. 15.07.2005 ; Бюл. № 7. – 10 с.
14. Пат. 77840. Україна. МПК G01J5/08, G01K7/00. Цифровий пірометр відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200501402 ; заявл. 15.02.2005 ; опубл. 15.01.2007 ; Бюл. №1. – 11 с.
15. Пат. 78064. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Спосіб надлишкових вимірювань дійсного значення температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200500301 ; заявл. 13.01.2005 ; Опубл. 15.02.2007 ; Бюл. №2. – 10 с.
16. Пат. 78428 С2. Україна. МПК G01J5/08. Оптичний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200507705 ; заявл. 02.08.2005 ; опубл. 15.03.2007 ; Бюл. №3. – 6 с.
17. Пат. 79162. Україна. МПК G01J5/10, G01J5/00, G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури нагрітого об'єкту за спектральним відношенням / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200504466 ; заявл.13.05.2005 ; опубл.25.05.2007 ; Бюл. №7. – 8 с.
18. Пат. 79192. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10, G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишко-вих вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200507703 ; заявл. 02.08.2005 ; опубл. 25.05.2007 ; Бюл. №7. – 10 с.
19. Избыточная термометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>.
20. Избыточная пирометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
21. Карташова А.Н. Технологические измерения и приборы в текстильной и легкой

промышленности : учебник для вузов / А.Н. Карташова, И.В. Дунин – Барковский. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312 с.

22. Кондратов В.Т. Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов / В.Т. Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Книга «Приборостроение». – М. : МГУ ПИ, 2007. – С. 134–143.

23. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 101–113.

24. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 2. – С. 21–22.

25. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 3. – С. 15–27.

#### References

1. Nedelko A.YU. "Preimushhestva i nedostatki beskontaktnogo izmereniya temperatury". URL: <http://lityo.com.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8/1949-preimushchestva-i-nyedostatki-beskontaktnogo-izmereniya-temperatury>.
2. Borodulina E. "Struktura, svojstva i tehnologiya stekla. Vyazkost". URL: <http://lenaborodulina.livejournal.com/13759.html>.
3. Tehnologiya proizvodstva i svojstva kvartsevykh opticheskikh volokon". URL: [http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya\\_proizvodstva\\_opticheskikh\\_volokon.pdf](http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya_proizvodstva_opticheskikh_volokon.pdf).
4. Kondratov V.T. Teoriya izbytochnykh izmerenij / V.T.Kondratov. – Vymiriuvalna ta obchyslyuvalna tekhnika v tehnologichnykh protsesakh. – 2005. – № 1. – s. 7–24.
5. Kondratov V.T., Zarnitsyna G.O. Problemy izmereniya temperatury ob'ektov ekosistemy/ V.T. Kondratov, G.O.Zarnitsyna. – Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii «Ekologicheskie problemy industrialnykh megapolisov», Doneczk – Avdeevka, 01-04 iyunja 2004. – Doneczk. DonNTU. – s. 499-505.
6. Kondratov V.T., Zarnitsyna G.O. O sozdanii pirometrov otnosheniya s avtomaticheskoy korektsiej pogreshnostej / Pratsi Luganskogo viddilennia mizhnarodnoi akademii informatyzatsii. Lugansk. – 2005. – s. 123–127.
7. Kondratov V.T., Zarnitsyna A.A., Serdyuk N.M. Digital optical pyrometer with automatic correction of systematic errors/ Jurnal of Automation and Information Sciences. – 2003. – Pp. 137–142 (Scopus search results: 15122747200/)
8. Deklaratsiynij patent 56614 A, Ukraina. MPK G01K7/00. Sposib vyznachennja dijsnogo znachennja temperatury/ V.T. Kondratov, G.O.Zarnitsyna, N.M.Serdiuk (Ukraina). – №2002076364; zajavl. 30.07.2002; opubl. 15.05.2003. Byul. № 5. – 14 c.
9. Deklaratsiynij patent 66299 A Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10. Optiko-elektronnij sposib nad-lyshkovykh vymiryuvan temperatury/ V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna, O.P.Riabov (Ukraina). – №2003109797; zajavl. 31.10.2003, opubl. 15.04.2004. Byul. №4. –16s.
10. Deklaratsiynij patent 55947 A, Ukraina. MPK G01J5/08, G01K7/00. Optychnij pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №2002076365; zajavl. 30.07.2002; opubl. 15.05.2003, Byul. № 4. – 7 c.
11. Deklaratsiynij patent № 68026 A, Ukraina. MPK G01J1/10, G01K7/00. Sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury/ V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna N.M.Serdiuk (Ukraina). – № 2003088013; zaiavl. 27.08.2003; opubl. 15.07.2004. Byul. – № 7. – 9 s.
12. Deklaratsiynij patent № 66084 A, Ukraina. MPK G01J5/20. Radiatsiynij pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna, N.M.Serdiuk (Ukraina). – №2003076909; zajavl. 22.07.2003; opubl. 15.04.2004, Byul. № 4. – 6 s.
13. Pat. № 73426. Ukraina. MPK G01J5/08. Pirometr spektralnogo vidnoshennia / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №20031212097; zaiavl. 23.12.2003; opubl. 15.07.2005, Byul. № 7. – 10 s.
14. Pat. № 77840. Ukraina. MPK G01J5/08, G01K7/00. Tsyfroviy pirometr vidnoshennia / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №a200501402; zaiavl. 15.02.2005; opubl. 15.01.2007, Byul. № 1. – 11 s.
15. Pat. № 78064. Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10. Sposib nadlyshkovykh vymiryuvan dijsnogo znachennja temperatury / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200500301; zajavl. 13.01.2005; opubl. 15.02.2007. Byul. № 2. – 10 s.
16. Pat. № 78428 C2. Ukraina. MPK G01J5/08. Optychnij pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №a200507705; zajavl. 02.08.2005; opubl. 15.03.2007. Byul. № 3. – 6 s.
17. Pat. № 79162. Ukraina. MPK G01J5/10, G01J5/00, G01K7/00. Optiko-elektronnij sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury nagritogo ob'ekta za spektralnym vidnoshennjam / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200504466; zajavl. 13.05.2005; opubl. 25.05.2007, Byul. № 7. – 8 s.
18. Pat. № 79192. Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10, G01K7/00. Optiko-elektronnej sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200507703; zajavl. 02.08.2005; opubl. 25.05.2007, Byul. № 7. – 10 s.
19. Izbytochnaja termometrija. URL: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>.
20. Izbytochnaja pirometrija. URL: – <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
21. Kartashova A.N., Dunin-Barokovskij I.V. Teknologicheskie izmereniya i pribory v tekstilnoj i lyogkoj promyshlennosti: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Lyogkaya i pischevaja prom-st, 1984. – 312s.
22. Kondratov V.T. Matematicheskie modeli izbytochnykh izmerenij I-go, II-go i III-go rodov / V.T.Kondratov. – Nauchnye trudy X-j Yubilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencsii «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroeniya, imformatiki i ekonomiki». – M.: MGU PI, 2007. – s. 134-143.
23. Kondratov V.T. Teoriya metrologicheskoy nadyozhnosti: funkczija raspredelenija Kondratova – Wejbullla/ V.T.Kondratov. – Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2008. – № 3. – s. 101-113.
24. Kondratov V.T. Novaya era razvitija teorii metrologicheskoy nadyozhnosti: funktsija raspredelenija Kondratova – Wejbullla, eyo raznovidnosti, svojstva i funktsionalnye vozmozhnosti / V.T.Kondratov. Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya. – 2009. – №2. – s. 21–22.
25. Kondratov V.T. Novaya era razvitija teorii metrologicheskoy nadyozhnosti – funktsiya raspredelenija Kondratova – Wejbullla, eyo raznovidnosti, svojstva i funktsionalnye vozmozhnosti / V.T.Kondratov. Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya. – 2009. – №3. – s. 15–27.

Рецензія/Peer review: 10.12.2014 р.

Надрукована/Printed: 19.1.2015 р.

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

## КОНФІДЕНЦІЙНА СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ

*В роботі вивчалися принципи побудови систем конфіденційного зв'язку, засновані на використанні широкосмугових сигналів. Важливою перевагою таких систем є передача в ефір безперервних у часі шумоподібних сигналів з дуже низькою спектральною густиною. Хаотичні коливання використовують для передачі інформації завдяки наступним властивостям: широкосмуговість; складність; ортогональність. Розглядається алгоритм створення генератора хаоса на основі цифрового оброблення сигналів. Основним змістом чисельного розв'язку систем диференціальних рівнянь є дискретизація інтервалів і функцій, для чого розроблений алгоритм у середовищі Matlab, наведені графіки спектральних і кореляційних властивостей хаотичних коливань. Розглянуті структури передавача і приймача системи широкосмугового конфіденційного зв'язку.*

*Ключові слова:* конфіденційний зв'язок, детермінований хаос, сигнали з розширеним спектром.

I.S. PYATIN, V.I. LUGHANSKIY, L.V. KARPOVA

Khmelnitsky National University

## CONFIDENTIAL COMMUNICATIONS SYSTEM

*The paper studied the principles of confidential communication systems based on the use of broadband signals. An important advantage of such systems is broadcasting continuous time noise signals with very low spectral density. The rapid increase of information transmitted in communication networks, raises the issue of confidentiality of transmission. The development of information technology tools improves unauthorized access. Promising methods of information security are being implemented at the level of physical channels of transmission. This is especially important for wireless security standards Radio Ethernet, GPRS, CDMA, etc. Chaotic vibrations are used to transmit information through the following properties: wideband; complexity; orthogonality. We consider the algorithm for creating chaos generator based on digital signal processing. The main content of the numerical solution of differential equations is the sampling interval and functions for which the algorithm among Matlab, shows graphs of spectral and correlation properties of chaotic oscillations. The structure of the transmitter and receiver system broadband confidential communication.*

*Keywords:* confidential communication, deterministic chaos spread spectrum signals.

### Вступ

Сучасний розвиток телекомунікаційних засобів нового покоління заснований на використанні широкосмугових сигналів з великою інформаційною ємністю. За рахунок розширення спектра частот несучих сигналів досягається збільшення швидкості передачі інформації, підвищується стійкість і надійність систем зв'язку при наявності завад.

Широкосмугові сигнали використовуються для передачі інформації в багатоканальних і багатоадресних CDMA системах з кодовим поділом (Code Division Multiple Access Systems), а також в бездротових системах зв'язку з розширенням спектра (Wireless Spread Spectrum Systems). До сучасних бездротових засобів зв'язку з CDMA висуваються високі вимоги щодо захисту переданої інформації від несанкціонованого доступу.

Застосування широкосмугових сигналів забезпечує високу пропускну здатність каналів, дозволяє послабити вплив багатьох видів завад і приймати повідомлення при співвідношенні сигнал / шум багато менше одиниці, а також боротися з впливом багатопроменевого поширення радіохвиль. Важливою перевагою широкосмугових систем є висока скритність бездротового зв'язку і електромагнітна сумісність з іншими радіоелектронними засобами за рахунок передачі в ефір безперервних у часі шумоподібних сигналів з дуже низькою спектральною густиною [1].

Останнім часом у зв'язку з розвитком супутникових, мобільних, стільникових, волоконно-оптичних багато користувачьких багатоканальних систем і завантаженістю радіодіапазону, а також у поєднанні з необхідністю забезпечення завадостійкого зв'язку, велику увагу привертає клас широкосмугових хаотичних сигналів. При використанні технології розширення спектру смуга частот переданого сигналу може бути зроблена значно ширше смуги частот інформаційного повідомлення.

У техніці зв'язку такі сигнали можуть формуватися у вигляді псевдовипадкових імпульсних послідовностей, які мають задані спектральні та кореляційні характеристики.

В даний час в системах зв'язку з розширенням спектра використовуються псевдовипадкові послідовності максимального періоду. М-послідовності генеруються простими алгоритмами.

У широкосмугових системах зв'язку всі користувачі працюють в одному частотному діапазоні, більш широкому, ніж у випадку традиційних вузькосмугових систем зв'язку з частотно-часовим поділом. У кожному абонентському каналі використовується свій ідентифікаційний код для розділення користувачів. На вхід приймального пристрою індивідуального користувача одночасно з корисним сигналом в заданій смузі частот надходять не тільки звичайні атмосферні завади, а сигнали від інших абонентів та відбиття за рахунок багатопроменевого поширення. Складна електромагнітна обстановка в зоні дії телекомунікаційних засобів накладає додаткові вимоги на систему псевдовипадкових сигналів, яка використовується для кодування і передачі інформації по каналах зв'язку.

З теорії інформації відомо, що найбільшу інформаційну ємність мають стохастичні сигнали, породжувані випадковими процесами. Основна проблема при розробці інформаційних носіїв у цифрових телекомунікаційних каналах полягає в труднощах генерування випадкових двійкових послідовностей із

застосуванням короткого задаючого ключа. Математичні алгоритми, які з ключа отримують псевдовипадкові послідовності, повинні мати наступні властивості:

- як завгодно велика довжина періоду псевдовипадкової послідовності;
- статистична подібність отриманої послідовності чисел властивостям звичайної випадкової вибірки;
- можливість програмно-апаратної реалізації генератора випадкових чисел для використання у каналі зв'язку з відповідною швидкістю.

### Особливості конфіденційних систем зв'язку

Стрімке збільшення обсягів інформації, що передається у мережах зв'язку, ставить питання забезпечення конфіденційності її передачі. Розвиток інформаційних технологій вдосконалює засоби несанкціонованого доступу (НСД). Перспективними стають методи захисту інформації, що впроваджуються на рівні фізичних каналів її передачі. Особливо це важливо для безпеки бездротових мереж стандартів Radio Ethernet, GPRS, CDMA, тощо. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є використання у конфіденційних системах зв'язку (КСЗ) радіоелектронного маскування (РЕМ), що являє собою комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на зниження ефективності засобів радіотехнічної розвідки. РЕМ може бути здійснено за рахунок методів передачі, що забезпечують енергетичну, структурну, інформаційну та інші види скритності сигнальних конструкцій.

З врахуванням виконуваних завдань радіотехнічні системи можна поділити на три основні класи [1]:

1) радіотехнічні системи передачі та управління – відносяться до класу КСЗ, призначених для передачі даних і сигналів управління;

2) системи руйнування інформації – відносяться до систем радіоелектронної протидії (РЕП), метою яких є створення навмисних завад, імітація помилкових інформаційних сигналів і перехоплення управління;

3) системи вилучення інформації – відносяться до класу систем НСД і вирішують завдання по несанкціонованому перехопленню переданих повідомлень, визначенню структури і параметрів сигналів, тощо.

Для оцінки ступеня захищеності КСЗ від систем РЕП противника і НСД доцільно використовувати поняття завадозахищеності.

Завадозахищеність – це властивість системи не тільки найбільш точно відтворювати передану інформацію на приймальній стороні, але і здатність забезпечувати її безпеку і цілісність від засобів РЕП і НСД за допомогою реалізації ефективних методів скритності передачі.

Розрізняють енергетичну, структурну, інформаційну та інші показники скритності.

Для підвищення енергетичної скритності передачі сигналу потрібно знижувати потужність основного випромінювання КСЗ, що можливо при використанні широкосмугових сигналів з базою  $B = \Delta f \cdot T \gg 1$ . Розширення бази сигналу дозволяє створювати сигнальні конструкції з дуже малою спектральною густиною потужності, що ускладнює їх виявлення при некогерентній обробці. Крім цього, використовуючи несучі сигнали з невідомою структурою можна збільшити апріорну невизначеність прийому при несанкціонованому доступі.

Застосування сигналів з великою базою дозволяє забезпечити високу енергетичну скритність сигнальних конструкцій. Таким чином, система зв'язку з складними широкосмуговими сигналами здатна працювати при співвідношенні  $P_c \ll P_{ш}$  [1, 2].

Це забезпечує скритність роботи передавача конфіденційної системи і можливість кодового поділу каналів [1, 2].

Використання хаотичних коливань для передачі інформації перспективно завдяки наступним властивостям:

- широкосмуговість: хаотичні сигнали неперіодичні і мають безперервний спектр. Для багатьох хаотичних сигналів цей спектр займає широку смугу частот. Вони використовуються для боротьби з загасанням сигналу в деякій смузі частот;

- складність: хаотичні сигнали мають складну структуру. Один хаотичний генератор може створювати різні коливання при незначних змінах початкових умов. Це ускладнює визначення внутрішньої будови генератора і передбачення сигналу на будь-який тривалий час, що використовується в криптографії;

- ортогональність: автокореляційна функція хаотичного сигналу стрімко загасає. Тому сигнали від декількох генераторів можна вважати некорельованими, тобто ортогональними, що використовується у багато користувачьких системах зв'язку.

Передача інформації з малою імовірністю помилки може бути виконана в тому випадку, якщо швидкість генерування інформації хаотичною системою, тобто топологічна ентропія системи не менша швидкості надходження інформації від її джерела, не враховуючи обмеження в каналі зв'язку (наприклад, спотворення сигналу через наявність шуму в каналі).

### Модель цифрового генератора хаосу на основі системи Лоренця

Розглянемо деякі схеми використання хаосу для передачі повідомлень. Створимо генератор хаосу на основі цифрового оброблення сигналів

При використанні цифрових сигнальних процесорів (ЦСП), або програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) можна забезпечити високу ідентичність параметрів хаотичних модулів передавача і приймача.

Термін «цифрова обробка сигналів» (ЦОС) охоплює досить широку область. Цифрові сигнальні

процесори містять вузли, що виконують множення з накопиченням. Ця операція характерна для дискретного перетворення Фур'є. Операції множення з накопиченням можуть виконуватися одночасно кількома виконавчими пристроями (використовується паралельний розрахунок), що підвищує швидкість алгоритмів ЦОС. Програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) мають більшу швидкість в порівнянні з цифровими сигнальними процесорами (ЦСП). Для ЦСП продуктивність може падати через необхідність обробки переривань. Для ПЛІС тактова частота є постійною величиною. ПЛІС серії Virtex-6 фірми Xilinx мають тактову частоту 600 МГц, що дозволить обробляти сигнали частотою до 300 МГц.

Основу хаотичних модулів складають кільцеві генератори. Оскільки генератори описуються системою диференціальних рівнянь, то за допомогою сигнального процесора необхідно реалізувати чисельне інтегрування цієї системи. В якості методу інтегрування можна використовувати метод Рунге-Кутта четвертого порядку.

Реалізацію хаотичного модуля приймача відрізняє поява в системі диференціальних рівнянь зовнішнього сигналу. Тому для використання методу Рунге-Кутта необхідно мати проміжні відліки вхідного сигналу для забезпечення відповідної точності методу. Частота дискретизації вхідного сигналу має у два рази перевищувати основну тактову частоту. Оскільки кодек має обмеження по частоті, то кожний другий відлік можна визначати інтерполяційними методами.

Розглянемо чисельні методи розв'язку системи диференціальних рівнянь. Нехай задана система диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, z) \\ \frac{dy}{dt} = g(x, y, z) \\ \frac{dz}{dt} = d(x, y, z) \end{cases}$$

Початкові умови:  $x(0) = x_0$ ;  $y(0) = y_0$ ;  $z(0) = z_0$ .

Основним змістом чисельного розв'язку таких систем є дискретизація інтервалів і функцій, що розглядаються. Для дискретизації відрізка часу  $[t_0, t_0 + T]$  розіб'ємо його на  $N$  частин вузлами  $t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_0 + T$  з кроком  $h = T / N$ , тобто  $t_{m+1} = t_m + h$ .

Для дискретизації функцій введемо позначення:  $x_m, y_m, z_m$  - наближене значення для невідомого точного значення  $x(t_m), y(t_m), z(t_m)$  в момент  $t_m$ . Для визначення  $x_m, y_m, z_m$  будемо використовувати метод Рунге-Кутта.

Передавач може бути побудований як система Лоренця:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma x + \sigma y \\ \frac{dy}{dt} = -xz + rx - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases} \quad (1)$$

Значення параметрів  $\sigma = 10$ ;  $r = 28$ ;  $b = 8/3$ ,  $t$  - час.

Розрахунок наближених значень виконується за виразами:

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= x_m + (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)/6 \\ y_{m+1} &= y_m + (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4)/6; \\ z_{m+1} &= z_m + (P_1 + 2P_2 + 2P_3 + P_4)/6 \\ K_1 &= hf(x_m, y_m, z_m); L_1 = hg(x_m, y_m, z_m); \\ P_1 &= hd(x_m, y_m, z_m); \\ K_2 &= hf(x_m + 0,5K_1, y_m + 0,5L_1, z_m + 0,5P_1); \\ L_2 &= hg(x_m + 0,5K_1, y_m + 0,5L_1, z_m + 0,5P_1); \\ P_2 &= hd(x_m + 0,5K_1, y_m + 0,5L_1, z_m + 0,5P_1); \\ K_3 &= hf(x_m + 0,5K_2, y_m + 0,5L_2, z_m + 0,5P_2); \\ L_3 &= hg(x_m + 0,5K_2, y_m + 0,5L_2, z_m + 0,5P_2); \\ P_3 &= hd(x_m + 0,5K_2, y_m + 0,5L_2, z_m + 0,5P_2); \\ K_4 &= hf(x_m + K_3, y_m + L_3, z_m + P_3); \\ L_4 &= hg(x_m + K_3, y_m + L_3, z_m + P_3); \\ P_4 &= hd(x_m + K_3, y_m + L_3, z_m + P_3). \end{aligned}$$

З наведених формул можна зробити висновок, що кожний наступний відлік сигналу розраховується з попереднього значення. Чим менший крок  $h$ , тим точніше ми можемо розрахувати хаотичний сигнал на

заданому відрізку, але буде використаний більший час. Тому для зменшення часу розрахунку необхідно вибирати крок  $h$  з врахуванням найменшої кількості точок, що відображають всі особливості поведінки системи Лоренця на осі часу. Наближення, що визначаються за методом Рунге-Кутта, мають похибки  $\|x(t_m) - x(t)\| = O(h^4)$ .

**Модельовання розв'язку системи Лоренця у середовищі Matlab**

В радіотехнічних системах з безперервним часом джерелом хаотичних коливань служать різні нелінійні коливальні системи з порядком не нижче третього: генератор на тунельному діоді з коливальним контуром і додатковою інерційністю, нелінійний неавтономний коливальний контур, кільцеві системи ФАП і ЧАП з відповідними фільтрами в колі зворотного зв'язку тощо.

Проаналізуємо у середовищі Matlab чисельний розв'язок системи Лоренця (1) методом Рунге-Кутта за формулами, наведеними вище. Розрахуємо також спектр такого сигналу, його автокореляційну (АКФ) і взаємкореляційну (ВКФ) функції за наступною програмою [3].

```
X0=0; y0=1; z0=1.05; h=0.07; sigma=10; r=28; b=8/3; P4=h*((x(m-1)+K3)*(y(m-1)+L3)-b*(z(m-1)+P3));
t0=0; t0T=100; t=t0:h:t0T; x(m)=x(m-1)+(1/6)*(K1+2*K2+2*K3+K4);
S=length(t0:h:t0T); x=zeros(1, S); y(m)=y(m-1)+(1/6)*(L1+2*L2+2*L3+L4);
y=zeros(1, S); z=zeros(1, S); z(m)=z(m-1)+(1/6)*(P1+2*P2+2*P3+P4); end
x(1)=x0; y(1)=y0; z(1)=z0; plot(t, x)
for m=2:1:S title('Часова діаграма сигналу детермінованого хаоса ')
K1=h*sigma*(y(m-1)-x(m-1)); SP=fft(x, 8192); SP1=fftshift(SP);
L1=h*(x(m-1)*(r-z(m-1))-y(m-1)); aSP=abs(SP1); figure; plot(aSP)
P1=h*(x(m-1)*y(m-1)-b*z(m-1)); title('Спектр сигналу детермінованого хаоса ')
K2=h*sigma*(y(m-1)+L1/2-(x(m-1)+K1/2)); ylim([0 1800])
L2=h*(x(m-1)+K1/2)*(x-z(m-1)-P1/2)-(y(m-1)+L1/2)); la=length(x);
P2=h*((x(m-1)+K1/2)*(y(m-1)+L1/2)-b*(z(m-1)+P1/2)); for i=1:la
K3=h*sigma*(y(m-1)+L2/2-(x(m-1)+K2/2)); s1(i)=x(la-i+1);
L3=h*(x(m-1)+K2/2)*(x-z(m-1)-P2/2)-(y(m-1)+L2/2)); end;
P3=h*(x(m-1)+K2/2)*(y(m-1)+L2/2)-b*(z(m-1)+P2/2); Ka=conv(s1,x); Na=length(Ka);
K4=h*sigma*(y(m-1)+L3- (x(m-1)+K3)); figure; plot(-la+1:1:la-1, (1/Na)*Ka);
L4=h*(x(m-1)+K3)*(x-z(m-1)-P3)-(y(m-1)+L3)); title('АКФ сигналу детермінованого хаоса ')
end;
```

Лістинг 1 – Код Matlab для дослідження розв'язку системи Лоренця в області часу

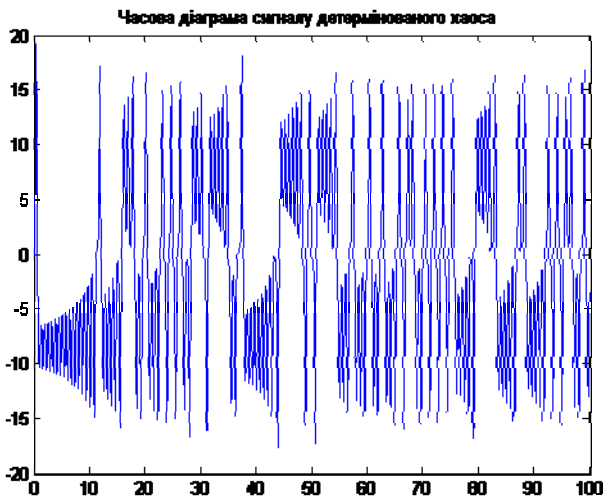


Рис. 1. Часова діаграма сигналу детермінованого хаосу

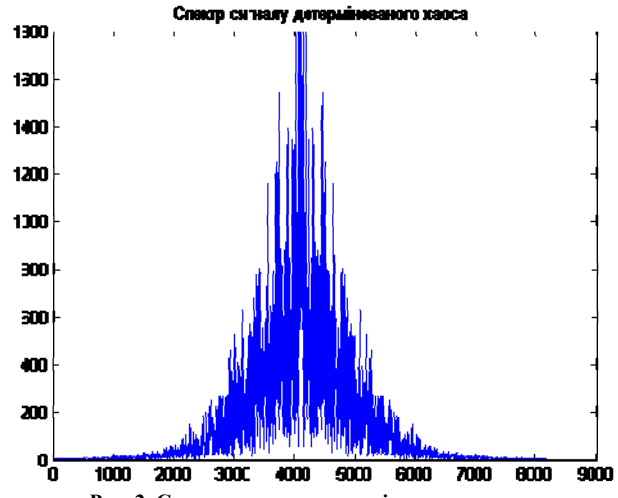


Рис. 2. Спектр сигналу детермінованого хаосу

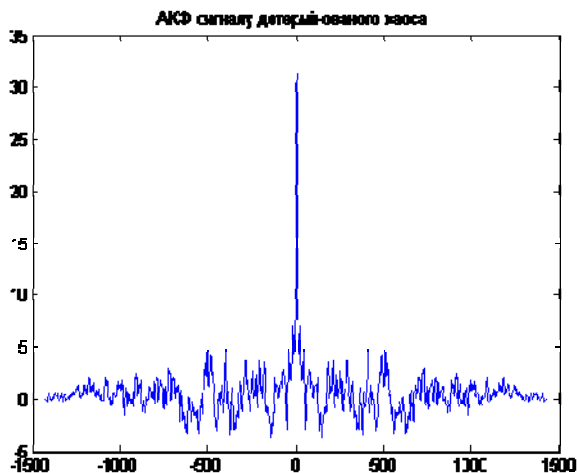


Рис. 3. АКФ сигналу детермінованого хаосу

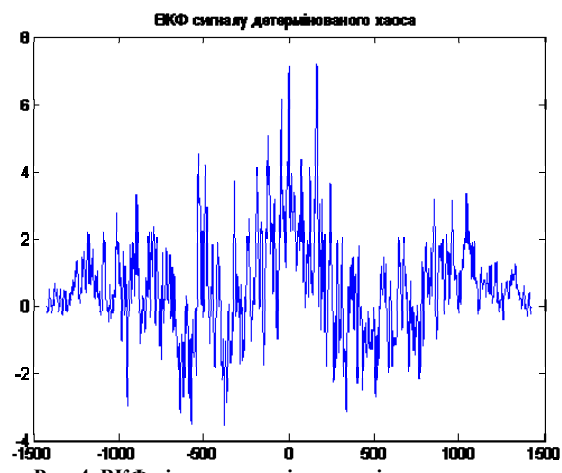


Рис. 4. ВКФ різних сигналів детермінованого хаосу

Результати виконання програми наведені на рис. 1 – рис. 3.

На рис. 4 приведена взаємна кореляційна функція (ВКФ) двох хаотичних сигналів, початкові умови яких по координаті  $x$  відрізняються на  $1 \cdot 10^{-6}$ . Відсутність чіткого максимуму кореляційної функції робить неможливим приймання таких сигналів.

Спектр, наведений на рис. 2 займає достатньо широку область частот, тобто хаотичний сигнал, що розглядається, ширококутовий. АКФ, наведена на рис. 3, має яскраво виражений максимум, що дозволяє виявляти сигнали з однаковою хаотичною поведінкою. Результати, приведені на рис. 4 свідчать про велику залежність форми хаотичних коливань від початкових умов. І навіть, якщо противник знає алгоритм розв'язку диференціальних рівнянь системи Лоренца, то початкові умови підібрати практично неможливо, що підвищує конфіденційність зв'язку.

### Структурна схема системи цифрового конфіденційного зв'язку

За результатами дослідження, наведеними на рис. 1 – рис. 4 можна зробити висновок, що хаотичні коливання з певним набором початкових умов можуть використовуватись в якості ключа, за яким один абонент може з'єднуватись з іншим. Сигнали інших абонентів є шумовими коливаннями, оскільки ВКФ двох хаотичних коливань з різними початковими умовами, має вигляд шуму. Структурна схема передавача конфіденційної системи цифрового зв'язку приведена на рис. 5.

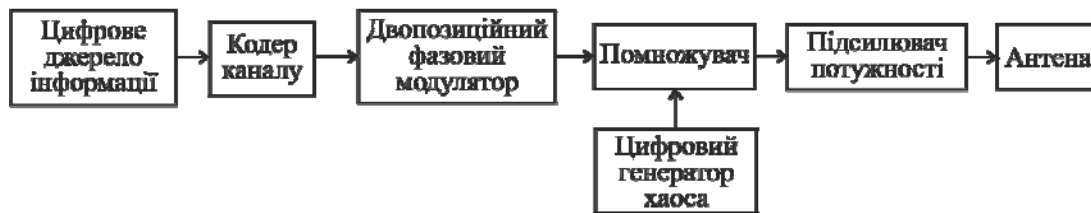


Рис. 5. Структурна схема передавача конфіденційної системи цифрового зв'язку

Цифрове джерело сигналу генерує цифровий сигнал – послідовність біт (символів) інформації. Цифровим джерелом може бути, наприклад, персональний комп'ютер, цифровий носій аудіо- або відеоінформації.

Кодер каналу використовується практично в усіх сучасних системах цифрового зв'язку. Його основне призначення – підвищення вірогідності переданої інформації. Збільшення достовірності передачі інформації відбувається шляхом додавання надмірності до переданої інформації. Це призводить до зниження швидкості передачі. Процес додавання надмірності до початкової інформації називається завадостійким кодуванням.

Вузкосмуговий модульований сигнал з довільним видом модуляції можна представити у вигляді:

$$s(t) = I(t)x(t) - Q(t)x(t), \quad (2)$$

де  $x(t)$  – хаотична несуча радіосигналу,  $I(t)$  і  $Q(t)$  називаються відповідно синфазною і квадратурною складовими модулюючого сигналу.

Таким чином, для здійснення довільного виду модуляції сигналу необхідно виконати дві операції: а) сформувати синфазну і квадратурну складові модулюючого сигналу (вид даних складових буде визначати вид модуляції); б) виконати перетворення (2).

Операції (1) і (2) виконуються різними вузлами передавального тракту. Операція (а) здійснюється в низькочастотному модуляторі, а операція (б) в модуляторі. Обидва вузла представлені на рис. 5 блоком Двопозиційний фазовий модулятор.

У системах з двопозиційною фазовою модуляцією модульоване коливання є синусоїдним з сталою амплітудою, але початкова фаза його може набувати двох значень, які відрізняються на  $180^\circ$  залежно від поточного символу бінарної послідовності, що передається.

Двопозиційна фазова модуляція може виконуватись за допомогою цифрового сигнального процесора. В цьому випадку модуляція може бути довільною. Здійснення того чи іншого виду модуляції визначається програмою, що виконується в низькочастотному цифровому сигнальному процесорі, а саме алгоритмом формування квадратурних складових з закодованого інформаційного сигналу.

Помножувач, на один вхід якого подається сигнал цифрового генератора хаосу, а на другий – сигнал з двопозиційною фазовою модуляцією, потрібний для перенесення вхідної бінарної послідовності в область хаотичної несучої частоти, а також для розширення спектра сигналу. Таким чином, структурно передавальний тракт можна розділити на цифрову і аналогову частини, розділені цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), що підключається на виході двопозиційного фазового модулятора.

Цифрова частина системи зв'язку зазвичай містить керуючий контролер або процесор, що забезпечує керування блоками аналогового і цифрового тракту і інтерфейс з користувачем.

Приймальний тракт цифрової системи зв'язку містить набір блоків, більшість з яких виконують функції, зворотні до виконуваних в передавачі (рис.6). Вхідний сигнал через підсилювач потужності надходить на помножувач, що звужує спектр сигналу і переносить його в область низьких частот. Далі сигнал надходить на АЦП і потім в процесор цифрової обробки сигналу (DSP). Процесор виконує низькочастотну фільтрацію, містить декодер каналу і декодер джерела. Далі, при необхідності, інформація перетворюється на аналогову форму за допомогою ЦАП (наприклад, для звукового відтворення) або



видається відразу в цифровий приймач інформації.

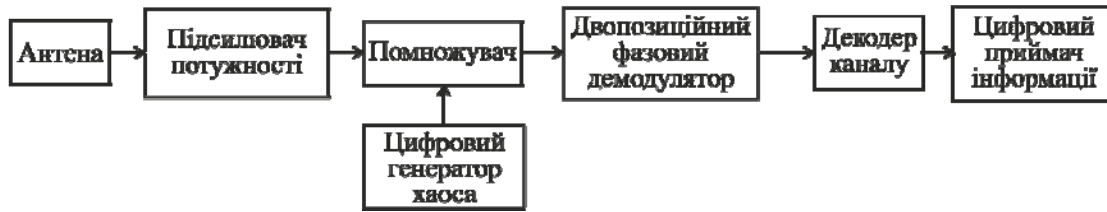


Рис. 6. Структурна схема приймача конфіденційної системи цифрового зв'язку

В приймальному тракці конфіденційної системи цифрового зв'язку обов'язкова наявність блоків синхронізації цифрових генераторів хаосу. При використанні цифрових генераторів хаосу достатньо точно задати початкові умови для розв'язку диференціальних рівнянь системи Лоренца методом Рунге-Кутта. Однакові алгоритми на боці передавача і боці приймача будуть забезпечувати синхронні часові діаграми хаотичних коливань. Необхідна також синхронізація на етапі встановлення з'єднання і початку сеансу конфіденційного зв'язку. В цьому випадку кожний біт інформаційного повідомлення буде мати хаотичний код розширюючий спектр послідовності. Ці хаотичні коди розпізнати за допомогою засобів несанкціонованого доступу буде неможливо, що підвищить конфіденційність зв'язку.

Цифровий генератор хаосу можна реалізувати на ПЛІС типу FPGA (Field-programmable gate array), що містять блоки множення-підсумовування, які широко застосовуються при обробці сигналів (DSP), а також логічні елементи (як правило, на базі таблиць перекодування – таблиць істинності) та їх блоки комутації. Програма зберігається в розподіленій пам'яті, яка може бути виконана як на основі енергозалежних комірок статичного ОЗП (подібні мікросхеми виробляють, наприклад, фірми Xilinx і Altera), в цьому випадку програма не зберігається при зникненні електроживлення мікросхеми, так і на основі енергонезалежних комірок Flash-пам'яті або перемичок antifuse (такі мікросхеми виробляє фірма Actel і Lattice Semiconductor) – в цих випадках програма зберігається при зникненні електроживлення.

### Висновки

Генератор хаосу формує шумоподібний сигнал. Для нього характерні неперіодичні траєкторії в часі, швидко спадаюча автокореляційна функція, суцільний безперервний спектр. Такі властивості роблять хаотичні сигнали перспективними з точки зору застосування в сучасних заводозахисних і конфіденційних системах зв'язку, де генератори хаосу грають роль формувачів несучих коливань. Специфіка хаотичного руху така, що найменші відхилення початкових умов генерації від номінальних значень призводять до істотної зміни форми коливання, що генерується. Отже, основною вимогою, що пред'являються до генераторів хаосу, є їх відтворюваність. Особливо важливою ця вимога стає при їх використанні в системах передачі інформації.

При побудові систем з розширенням спектру структура передаючої і приймальної апаратури залишається традиційною для даного класу систем зв'язку. Але генератор псевдовипадкової послідовності на передавальній стороні замінюється генератором хаотичного сигналу, аналогічний генератор поміщається також в приймач. Щоб ці генератори працювали синхронно, застосовується схема стеження за затримкою, а на початку сеансу зв'язку в канал передаються початкові умови для генерації. У разі втрати синхронізації відновити стеження можна тільки шляхом одночасного перезапуску генераторів хаосу у приймачі і передавачі. Перевагою такої CDMA-системи перед звичайною є практично необмежена ємність ансамблю послідовностей, що розширюють спектр. Недолік схеми – складність пошукової процедури при втраті синхронізації.

### Література

1. Горохов С.М. Критерии эффективности скрытых методов передачи / С.М. Горохов, Н.В. Захарченко, В.В. Корчинский // Цифрові технології. – 2012. – № 12. – С. 147–150.
2. Дмитриев А.С. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2002. – 252 с.
3. Пятін І.С. Дослідження широкосмугових сигналів з двопозиційною фазовою маніпуляцією / І.С. Пятін, Р.В. Сорокатий, Ю.В. Лавренюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 170–175.

### References

1. Gorohov S.M. Kriterii effektivnosti skrytykh metodov peredechi. S.M. Gorohov, N.V. Zaharchenko, V.V. Korchinskiy. Tsifrovi tehnologii №12, 2012. s. 147-150.
2. Dmitriev A.S. Dinamicheskii haos: novye nositeli informatsii dlia sistem svyazi. A.S. Dmitriev, A.I. Panas. M.: Izdatelstvo Fiziko-matematicheskoy literatury, 2002. 252s.
3. Pyatin I.S. Doslidzhennia shirokosmugovih sygnaliv z dvopozitsiynoyu fazovoyu manipuliatsieyu/ I.S. Pyatin, R.V. Sorokatiy, Yu.V. Lavreniuk. Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. № 2, 2014. s. 170-175.

Рецензія/Peer review : 11.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор Ройзман В.П.



## МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАТ ІЗ ВБУДОВАНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОСМУГОВИХ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

*Стаття присвячена аналізу електромагнітних випромінювань плат із вбудованими компонентами. Наводяться загальні принципи моделювання, порядок формування моделі, досліджується вплив на сумарне випромінювання лінії передачі із вбудованими компонентами довжини основних ділянок лінії, параметрів сигналів збудження та глибини занурення в плату вбудованого компонента.*

*Ключові слова: хаотичний сигнал, плата, лінія передачі, електромагнітна сумісність, паразитні випромінювання*

O.B. GOLEVYCH, O.S. PYVOVAR  
Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

### MODELING RADIATION PLATEAU WITH BUILT-IN COMPONENTS TO TRANSMIT BROADBAND CHAOTIC SIGNAL

*Abstract - The article analyzes the electromagnetic radiation boards with embedded components. We present the general principles of modeling, formation model to investigate the influence of the total radiation transmission line with embedded components fixed length line plots, excitation signal parameters and depth of the recess in charge built-in component.*

*Keywords: chaotic signal charge, transmission line, the electromagnet compatibility, spurious radiation.*

#### Вступ

Ринковий попит широкими верствами населення засобів мобільного зв'язку вимагає розробників та виробників застосовувати новітні схеми обробки сигналів із розширеним спектром (3G,4G). В цьому аспекті дуже перспективними є використання хаотичних цифрових широкосмугових сигналів [1]. Крім того загальна тенденція до мініатюризації пристроїв і збільшення загальної щільності упаковки вимагає застосування нових конструкцій просторової реалізації апаратури на основі плат із вбудованими компонентами.

Вбудовування компонентів дозволяє поліпшити електричні характеристики плат завдяки скороченню довжини зв'язків, збільшити надійність за рахунок зменшення числа паяних з'єднань, зменшити масу і габарити виробів. З іншого боку, підвищується складність виготовлення плати, а також обмежується їх ремонтпридатність та тестопридатність.

Щоб мати хоча б мінімальні гарантії працездатності та електромагнітної сумісності (ЕМС) багатопланових плат на частотах вище 100МГц, слід обов'язково провести попереднє електромагнітне моделювання ліній передач та плати загалом у різних аспектах та з різних боків. Особливо актуально це для широкосмугових надвисокочастотних багатопланових плат, де лінії передачі розглядаються як лінії із розподіленими параметрами та обов'язково враховується частотна залежність матеріалів плати та компонент.

**Метою статті** є порівняння паразитних випромінювань широкосмугових хаотичних сигналів ліній передач плат із планарними та вбудованими компонентами на основі комп'ютерного моделювання у спеціалізованому середовищі багатомірного аналізу електромагнітних полів ліній передач, подання рекомендацій щодо проектування плат із використанням вбудованих компонент.

#### Сутність та можливості програм моделювання вбудованих компонент

Як правило, програмна симуляція виявляється набагато дешевшою і ефективнішою за переробку проекту по декілька разів. Цей напрямок у розробці плат називається – аналіз цілісності сигналів. Моделі для електромагнітної симуляції поділяють на моделі драйверів (приймачів та передавачів), моделі ліній передачі, моделі перетинок, теплові моделі тощо. У всіх програмах електродинамічного моделювання є можливість і побудови власних моделей, що не дають повністю адекватних результатів, але за їх допомогою можливо визначити "вузькі місця" де виникають проблеми із перехресними завадами, цілісністю сигналів та небажаним стороннім випромінюванням.

Для проведення симуляції роботи плат можуть використовуватися інструментальні засоби аналізу електромагнітної сумісності (ЕМС): Omega Plus, Signal Integrity Analyzer, BoardSim, ХТК та ін. Одна з найуспішніших, на сьогоднішній день на ринку, є пакет програм моделювання друкованих плат фірми Mentor Graphics – Hyperlynx. Подібні спеціалізовані САПР структурно можна розділити (рис. 1) на три групи: і калькулятори, програми 2D аналізу та 3D аналізу.

Калькулятори використовують емпіричні або напівемпіричні співвідношення уже завантажені в вигляді формул для обрахунку параметрів окремих ділянок лінії передачі за її геометрією та електричними характеристиками матеріалів. Під 2D аналізом розуміється технологія використання аналізу електромагнітного поля ліній передачі лише у перетині (двох розмірностях) вважаючи що у наступній ділянці лінії поле аналогічне. На початку та наприкінці лінії передачі розраховуються інтегральні параметри за якими лінії або моделі поєднуються та розрахунково зв'язуються одна з одною. За допомогою 2D аналізу можна розроблювати перед- і пост-аналіз ЕМС плати. Під 3D аналізом розуміють аналіз передаючих структур у трьох вимірах, що вимагає від ядра САПР проведення надзвичайно великої кількості розрахунків за тривалий час, але адекватність отриманих результатів наближається до 100%.

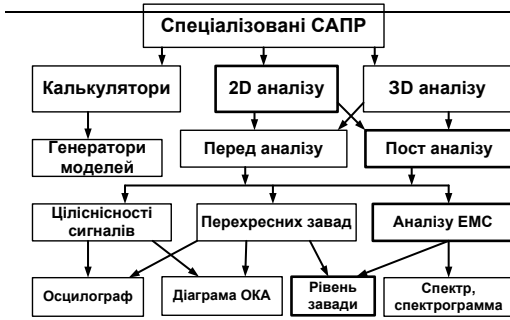


Рис 1. Класифікація програмних засобів електродинамічного моделювання плат

Результати аналізу програмами симуляції можуть надходити в текстовому або графічному вигляді. Найбільш популярний формат текстового вигляду – файли електронних таблиць EXCEL. Найбільш поширений формат графічного вигляду – електронний осцилограф або спектроаналізатор.

**Моделі та порядок дослідження EMC плат**

Для аналізу EMC необхідно визначити випромінювання пристрою, що на етапі проектування зробити практично не можливо, але можливо провести оцінювання завдяки виділенню

опосередненої лінії передачі та аналізу напруженості поля віртуальною антеною у програмах симуляторів. Для цього пристрій, що розробляється розбивається на функціональні модулі (рис.2) з друкованими платами, обирається певна друкована плата. З друкованої плати екстрагується електрична лінія передачі, для лінії передачі будуються моделі усіх ділянок, призначаються моделі драйверів, перехідних отворів та усіх компонент.

Стимулом тестової цифрової лінії передачі є імпульсний сигнал прямокутної форми, де частоту, порядок імпульсів та коефіцієнт заповнення імпульсів можливо змінювати. Ці параметри, разом із параметрами лінії передачі є вхідними змінним для дослідження EMC за різних обставин. Під час проведення аналізу випромінювання віртуальна антена розташовується на умовній відстані у 3м від плати із лінією передачі. При цьому автоматично плата або антена обертається по усім координатам та проводить пошук максимуму випромінювання. Максимальне значення може порівнюватись або із аналогічним випромінюванням плати прототипу для порівняння, або із нормативними документами, що обмежують рівень цього випромінювання певними значеннями.

Прототипом для порівняння багатшарових друкованих плат із вбудованими компонентами є також багатшарові плати, але тільки із планарними компонентами, що розташовані із одного або іншого боку.

Критерієм для порівняння може бути або максимальне значення випромінювання, або сукупне значення випромінювання, можуть також встановлюватись певні обмеження на випромінювання певних частот [2]. В рамках використання плат із вбудованими компонентами для отримання та обробки хаотичних широкосмугових сигналах доцільніше за критерій обрати сумарну потужність випромінювання у простір сигналу :

$$P_{\Sigma} = S_A \sum_{l=1}^N E_l^2; \quad S_A = 1m^2$$

де  $P_{\Sigma}$  - сумарна потужність прийнятого випромінювання на еквівалентній антені із вхідним умовним опором у 10м; де  $S_A$  - ефективна площа поверхні антени, що приймає випромінювання лінії передачі;  $E_l$  – напруженість електромагнітного поля у точці прийому для l-ї складової спектру (В/м).

Сумарна потужність випромінювання фронту хаотичного широкосмугового сигналу, що рухається від передавача до приймача і назад, випромінюючи по дорозі електромагнітну енергію, може привести до порушення норм EMC та спричинити інші негативні явища, наприклад, несанкціоноване витікання інформації.

Для проведення досліджень найбільш наближених до реальності модель лінії передачі була екстрагована із проекту вже працездатної печатної плати пристрою, який являє собою спеціалізований процесор для керування системою передачі даних та цифровим телефонним зв'язком. Ядром пристрою є системна плата, що здалеку нагадує структуру системної плати побутової ПЕОМ. На платі встановлені стандартні інтерфейси обміну даними, такі як FSB, PCI, AGP, USB та інші, завдяки чому вона може бути чудовим джерелом екстракції тестових ліній передачі для проведення всебічного аналізу.

Модель тестової лінії (рис.3) складається із двох частин варіативної та стаціонарної. Стаціонарна частина являє собою високошвидкісну лінію передачі занурену у 3 шар печатної плати. Довжина лінії у типовому варіанті сягає близько 15см (6дюйм). Крім неї присутні також ділянки ліній до 1см, що є моделями контактних майданчиків та перетинок. Модель драйверу передавача являє собою користувацьку модель, що формує лінійні фронти під час живлення віртуального логічного елемента напругою PCI рівнів у 3,3В. Модель стеку шарів багатшарової плати для тестової лінії передачі відповідає стеку шарів вже виготовленої плати та запущеної у масове виробництво. Тому такий стек шарів є актуальним. Плата має у своєму складі 14 металевих шарів і більше двох десятків діелектричних, на платі присутні контактні майданчики та отвори, мікросмужкові та смужкові лінії передачі, шари суцільної металізації та шари захисту.

Всі результати моделювання були отримані на основі обробки даних спектрального аналізу сигналу антени на відстані 3м у середовищі Hyperlynx. Така відстань відповідає середній зоні випромінювання та враховує середню відстань електромагнітного впливу одних виробів на інші. Відстань до тестової антени у 3м є типовим і, як правило, не охоплює ближню зону, значення потужності поля в якій є важко контрольованим та передбачуваним.

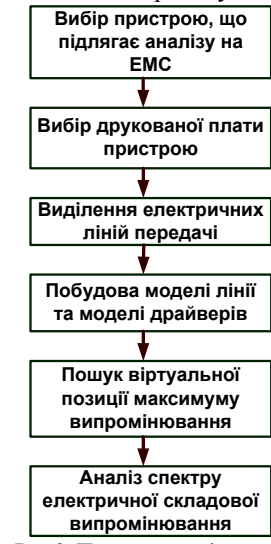


Рис 2. Порядок дослідження плат на EMC

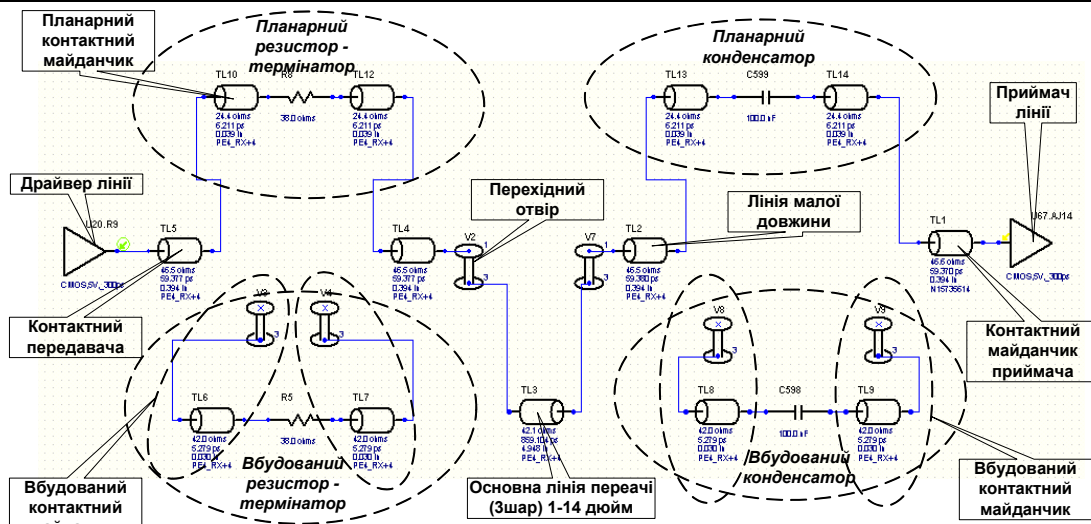


Рис 3. Модель тестової лінії передачі для проведення порівняльного аналізу та досліджень

**Результати моделювання ЕМС плат із вбудованими компонентами**

Сигналом стимулу драйвера обрано імпульсний сигнал із частотою 133МГц, шпаруватість якого можна змінювати від 5% до 50%. Значення окремих спектральних складових оброблялися у середовищі MS EXCEL для обчислення сумарної енергії та представлено у вигляді графіків залежностей.

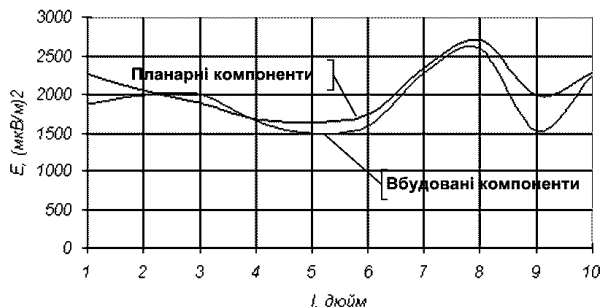


Рис 4. Залежність сумарної потужності складових спектру від довжини основної ділянки узгодженої тестової лінії передачі

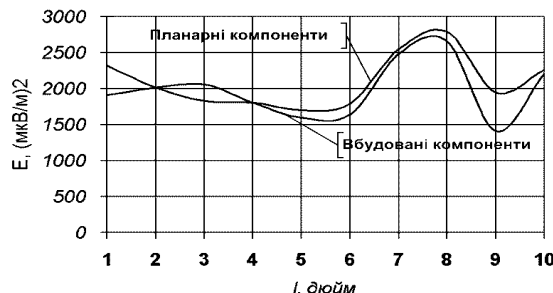


Рис 5. Залежність сумарної потужності складових спектру від довжини основної ділянки неузгодженої тестової лінії передачі

Найбільш впливовим фактором, що викликає різноманітні проблеми із ЕМС є довжина лінії передачі. Із збільшенням довжини лінії передачі збільшуються втрати високочастотного сигналу, змінюється АЧХ та ФЧХ лінії передачі, що приводить до лінійних спотворень у сигналі, збільшується кількість паразитних ефектів та збільшується кількість агресорів, що "переливають" електромагнітну енергію в лінію – жертву, спотворюючи сигнал. Тому в першу чергу проводилось дослідження впливу довжини узгодженої та неузгодженої лінії передачі на випромінювану потужність (рис. 4,5).

Узгодження лінії передачі із розподіленими параметрами важливий фактор, в усіх рекомендаціях фахівців із автоматичного трасування плат та нормативної галузевої літератури, навіть для ліній, що можливо вважати лініями із зосередженими параметрами рекомендується встановлювати узгоджуючі термінатори. Тому проведено дослідження впливу неузгодження близько 30% , що в нашому випадку відповідає зміні значення терміную чога резистора з 38 Ом до 28 Ом.

Параметром дослідження (рис. 4,5) є довжина основної ділянки лінії передачі. За результатами дослідження можливо зробити висновки, що для узгодженої та неузгодженої лінії передачі випромінювання лінії передачі із вбудованими компонентами є меншим за випромінювання лінії передачі із планарними компонентами в середньому на 15%. Із збільшенням довжини лінії передачі ця різниця збільшується. В початковій ділянці, що відповідає лініям передачі із зосередженими параметрами планарні компоненти реалізують у моделі дещо меншу випромінювану потужність, це пояснюється тим, що отвори, необхідні для підключення вбудованих компонент вносять відносно великі реактивності та нерегулярності в короткі лінії передачі та обумовлюють погіршення ситуації. Для ділянок середньої та великої довжини ефект від впровадження вбудованих компонент більш значущий, та зростає із зростанням довжини лінії передачі.

Наступний параметр, який може вплинути на випромінювану потужність та спотворити ситуацію із ЕМС є частота імпульсів стимулу (рис.6). Залежність випромінюваної потужності від частоти не викликає сумніву, при чому, ця залежність носить резонансний характер, завдяки тому, що, як вже повідомлялось, на високих частотах для ліній передачі із розподіленими параметрами різко проявляється вплив частото залежних реактивностей.

За результатами дослідження (рис.8) загальна залежність сумарної випромінюваної потужності має аналогічний характер як для лінії із вбудованими компонентами так і для лінії прототипу. При цьому спостерігається близько 7% в середньому зменшення сумарного рівня випромінювання для плат із вбудованими компонентами по усьому частотному діапазону аналізу.

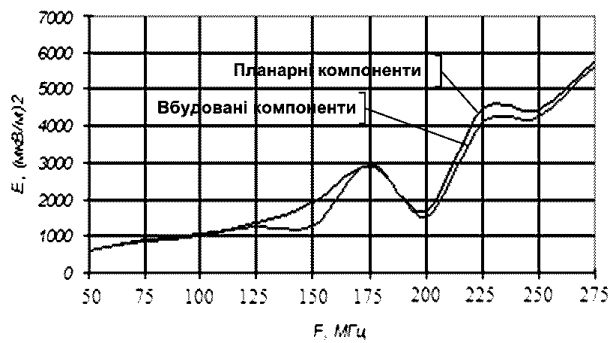


Рис 6. Залежність сумарної потужності складових спектру від частоти імпульсів стимулу

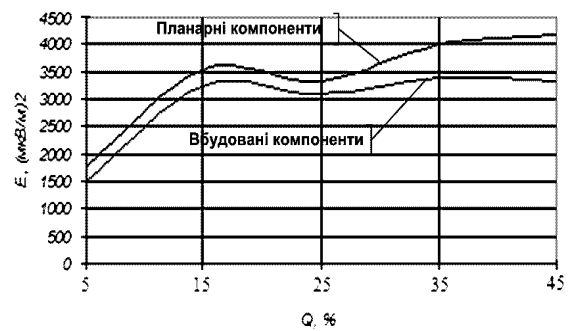


Рис 7. Залежність сумарної потужності складових спектру від коефіцієнту заповнення імпульсів стимулу

Слушним є дослідження впливу коефіцієнту заповнення імпульсів на сумарну сторонню випромінювану потужність. Коефіцієнт заповнення імпульсів із інформаційної точки зору відповідає за ефективність кодування сигналу каналними кодерами. Канальні кодери – невід’ємна частина високошвидкісних інтерфейсів. В ідеальному випадку середньостатистично інформаційний сигнал має бути близьким до меандру. Чим гірше кодування, тим менший коефіцієнт заповнення імпульсу в еквіваленті.

Результати аналізу (рис.7) впливу фактично шпаруватості імпульсів на ЕМС, що лінії передачі із вбудованими компонентами більш чутливі до способу кодування та за умови кодування, що наближається до оптимального забезпечують перевагу по мінімізації випромінювання близько 25% над прототипом із планарними компонентами.

Вбудовані компоненти на багатошаровій печатній платі можуть розташовуватись у різних шарах, *інтуїтивно* слід було б вважати, що із зростанням номеру шару відносно верхнього рівень випромінювання буде зменшуватись, але проведені дослідження (рис.8) твердять дещо іншу картину. Заглиблення компоненту у внутрішні шари має сенс для шарів із номером більше за 5. Розміщення компоненту у більш глибоких шарах не призводить до суттєвого зменшення паразитного випромінювання. Це пояснюється суттєвим зростанням екранування вбудованого компоненту шарами, що розташовано зверху та одночасним збільшенням довжини мікроотвору або отвору, який зв’язує відповідний пасивний компонент із драйверами та роз’язками, що зазвичай встановлюються на зовнішніх шарах багатошарової плати.

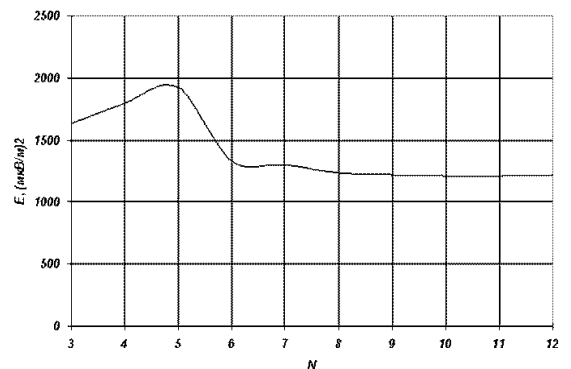


Рис 8. Залежність сумарної потужності складових спектру від номеру шару заглиблення вбудованого компоненту тестової лінії передачі

### Висновки

1. Для аналізу електродинаміки друкованих плат найбільш доцільними двовимірні аналізатори електромагнітного поля ліній передач, що розглядають ділянки однорідних ліній передач та електродинамічні моделі інших компонент з точки зору зосереджених параметрів. Такий підхід дозволяє забезпечити максимальну швидкість видачі результатів оцінкових результатів.

2. Запропонована модель для дослідження ЕМС печатних плат на основі типової лінії передачі, складається із драйверів, ділянок планарних та вбудованих компонент, ліній передачі та перехідних отворів. Подібна лінія передачі є типовою для високошвидкісних інтерфейсів багатошарових плат, тому найбільш придатна для аналізу з точки зору ЕМС.

3. Сформований критерій та проведено дослідження впливу на ЕМС таких параметрів як довжина лінії передачі, частота сигналу, шпаруватість імпульсів, рівень розузгодження лінії, глибина розташування вбудованого компоненту. За результатами досліджень плата із вбудованими компонентами за рівнем ЕМС переважає еквівалентну плату із планарними компонентами в середньому до 15%.

### Література

1. Голевич О.Б., Пивовар О.С. Використання хаотичних сигналів у багатоканальних надширококустових системах зв'язку. //ВОТТП.-2013.-№3.-С.180.  
 2. Джонсон Говрад В. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии.:Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005, - 1024с.:ил. – Парал. тит. англ.

### References

1. Golevych O.B., Pyvovar O.S. Vykorystannya khaotychnykh syhnaliv u bahatokanalnykh nadshyrokosmuhovykh systemakh zv'yazku. //VOTTP.-2013.-№3.-S.180  
 2. Djonson Govrad V. Vysokoskorostnaya peredacha cifrovyyh dannyh: vysshyy kurs chernoy magii.:Per. s angl. – М.: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2005, - 1024s.:il. – Parал. tit. angl.

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ШКАЛЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ МНОГОЗНАЧНЫХ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ МЕР С НЕОДИНАКОВЫМИ РАЗМЕРАМИ КВАНТОВ

В статье рассмотрено виды ЦАП на резистивных делителях тока и напряжения, а также проанализировано их сильные и слабые стороны. В итоге поставлена задача теоретически рассчитать параметры (характеристики) для ЦАП с двумя резистивными делителями напряжения, тем самым уменьшив количество прецизионных резисторов. Рассмотрен метод с использованием шкалы нониуса и применение ее принципа в создании более точной шкалы, применив при этом одинаковые технические расходы.

Ключевые слова: ЦАП, резистивный делитель напряжения, единица квантования, градация, нелинейность, шкала, линейка.

V.O. VARESHKO

Khmelnytskyi National University, Ukraine

### ON POSSIBILITY OF DEVELOPING THE LINEAR SCALE FOR INFORMATION CONVERTERS USING TWO MULTI-VALUED ADJUSTMENT-FREE MEASURES WITH VARYING SIZES OF QUANTA

In the paper, types of DAC on resistive dividers of current and voltage are considered, and their merits and demerits are analyzed. Finally, there is stated a problem to compute theoretically parameters (characteristics) for DAC with two voltage resistive dividers for decreasing number of precision resistors. A method with vernier scale usage is considered, as well as its principle application for developing more precise scale, where the same technical resources are spent.

Keywords: DAC, resistive voltage divider, unit quantization scale, linearity, range.

#### Вступлення

Современный мир заполнен как естественными, так и искусственными радиосигналами, поэтому электронные преобразователи информации стремительно развиваются, наполняя эфир новыми сигналами. Трудно представить нынешнему человеку свою повседневную жизнь без телевизора, радио или мобильного телефона. С каждым днем на рынке становится все больше подобных товаров, а потому удешевление таких устройств за счет экономии определенных деталей, не снижая при этом функциональной способности, позволяет поднять спрос на продукцию и открывает новые рынки сбыта. Поэтому развитие радиотехники актуально сегодня как никогда ранее. В частности ведутся исследования по совершенствованию аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП), которые играют очень важную роль чуть ли не во всех электронных приборах.

ЦАП классифицируют по различным признакам: назначению и составу, выполняемым функциям, электрическим характеристикам, конструктивно-технологическим и эксплуатационным свойствам. Базовые группы ЦАП определяют в соответствии с принципом действия, структурой и типу основных блоков (рис. 1). В этой статье будет идти речь о возможном улучшении шкалы формирования напряжения параллельного ЦАП на резистивном делителе напряжения [1].

#### Анализ первоисточников

Рассмотрев основные группы ЦАП, можно сделать вывод, что известно много методов преобразования код — напряжение [2]. Эти методы существенно отличаются друг от друга потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации, а также интегральной и дифференциальной нелинейностью.

Точность ЦАП зависит от степени температурного согласования сопротивления резистивных матриц, стабильности опорного напряжения, характеристик ОУ и внутренних сопротивлений переключателей. Погрешность переходного процесса, т.е. выбросы на фоне выходного сигнала обусловлены тем, что переключающие элементы ЦАП имеют разные времена включения и выключения. Основной характеристикой ЦАП является передаточная характеристика  $U = f(N)$ , которая представляет собой ступенчатую кривую. Для оценки этих различий вводятся статические и динамические параметры [3]. Анализируя эти характеристики можно попытаться создать принципиально новую схему делителя. На данном этапе исследования можно лишь теоретически предполагать качество новой схемы, которая будет основана на преимуществах разного рода делителях напряжения. По этому, все положительные и отрицательные характеристики этого метода пока что можно определить лишь, основываясь на предшествующих схемах. А статья поверхностно описывает



Рис. 1. Основные группы ЦАП



математическую составляющую нового метода построения схемы делителя.

Также был упомянут метод использования двух многозначных нерегулируемых мер с неодинаковыми размерами квантов, который применяется для измерения малых значений искомым величин. Этот метод подробно описан в [4]. Именно этот метод, – принцип нониуса, дал толчок для создания нового вида построения шкалы для ЦАП, исследуемой в статье.

**Цель статьи**

Исследуется возможность усовершенствования шкалы преобразователя информации с использованием двух наборов резисторов, которые отличаются на единицу. Описан принцип создания исследуемой линейки на резистивных делителях напряжения. Предполагается, что есть алгоритм, который даст возможность изначально определить коды вспомогательных линеек для достижения искомого выходного напряжения. Результатом такой работы будет экономия средств для создания многоразрядного цифро-аналогового преобразователя с помощью принципа нониуса (за счет различной цены деления линеек).

**ЦАП с двумя резистивными делителями напряжения**

Любой ЦАП представляет собой устройство, на вход которого подается код, а на выходе создается ступенчато изменяющаяся аналоговая величина заданного размера (рис. 2). Входной код обычно — это двоичный код, исходной величиной может быть напряжение, ток, сопротивление, частота, угол поворота, линейное смещение, световой поток.

В данной работе рассматривался вариант, когда на вход подается двоичный код, а на выходе — напряжение. Рассмотрим гибридную шкалу ЦАП, что получена из нескольких резистивных делителей Кельвина (рис. 3) и разность их значений через аналоговый сумматор.

Основой такого преобразователя будут две шкалы с различными градациями. Они обе формируются из делителей Кельвина с разным количеством резисторов и одинаковым напряжением. Лучше выбирать разницу делящихся элементов в один резистор, или когда их количества взаимно просты. Подробнее это описано в [5].

Преимуществом схемы делителя Кельвина (цугового ЦАП) является малая дифференциальная нелинейность и гарантированная монотонность характеристики преобразования. Недостаток схемы — необходимость изготавливать на кристалле большое количество ( $2^N$ ) согласованных резисторов. Тем не менее, в настоящее время выпускаются 8-ми, 10-ти и 12-ти разрядные ЦАП данного типа с буферными усилителями на выходе, а это значит, что для их создания нужно 256, 1024 и 4096 прецизионных резисторов и ключей соответственно [2].

Руководствуясь преимуществами и недостатками характеристики делителя Кельвина, был рассмотрен способ уменьшения количества согласованных резисторов. В обычном делителе используется ряд последовательно соединенных резисторов, которые линейно и равномерно делят напряжение (входное или опорное для АЦП или ЦАП соответственно), образуя, таким образом, шкалу, как в термометре [2]. Преимущества такой шкалы очевидны. Это линейность измерений, точность в рамках цены деления, максимальное быстродействие (для преобразователей), но если нужно измерить большие величины или амплитуды колебаний с достаточно большой точностью, то возникает проблема — количество градаций на шкале. В преобразователях — это их разрядность. Итак, чтобы решить проблему с разрядностью, потребуется новый подход для получения шкалы, используя все преимущества предыдущей.

Был рассмотрен метод с использованием шкалы нониуса. Нониус — вспомогательная шкала, устанавливаемая на различных измерительных приборах и инструментах, служащая для более точного определения количества долей делений. Принцип работы шкалы основан на том факте, что глаз гораздо точнее замечает совпадение делений, чем определяет относительное расположение одного деления между другими. Шкала-нониус обычно также имеет, например, 10 делений, что и основная шкала, а по длине равна только 9 её делениям (рис. 4 а) [6]. Для электронных измерителей это означает, что нужно два набора по 10 резисторов и два источника опорного напряжения на каждый набор. Однако целесообразнее использовать один источник напряжения, как с экономической стороны, так и с технической (технологической). В таком случае шкала изменит свой вид, как показано на рис. 4 б. Это значит, что для одного источника опорного напряжения нужно разное количество резисторов на делителях напряжения. Причина изъясняется в [5] в виде задачи на нахождение максимальной площади прямоугольника с заранее

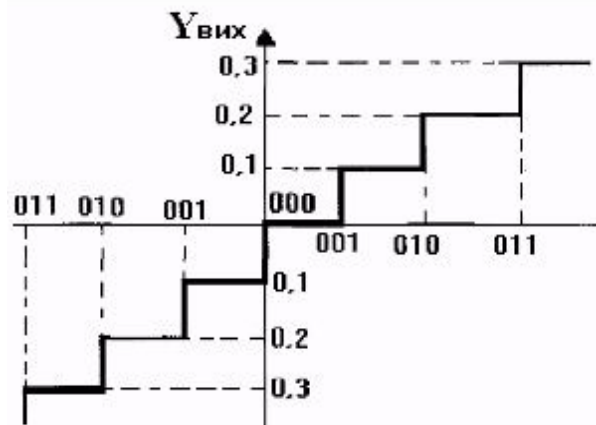


Рис. 2. Связь между входом и выходом ЦАП

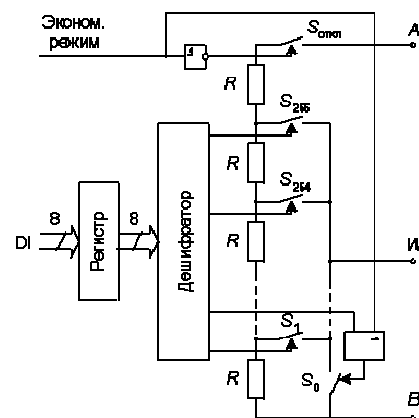


Рис. 3. Структура взвешивающего восьмиразрядного ЦАП (делитель Кельвина)

определенным его периметром, где количество первого и второго наборов резисторов будет соответственно определять длину и ширину прямоугольника. В любом случае, если первая шкала имеет цену деления  $x_1$ , а вторая —  $x_2$ , то единица квантования всей линейки будет определяться по формуле:

$$\Delta x = |x_1 - x_2| . \tag{1}$$

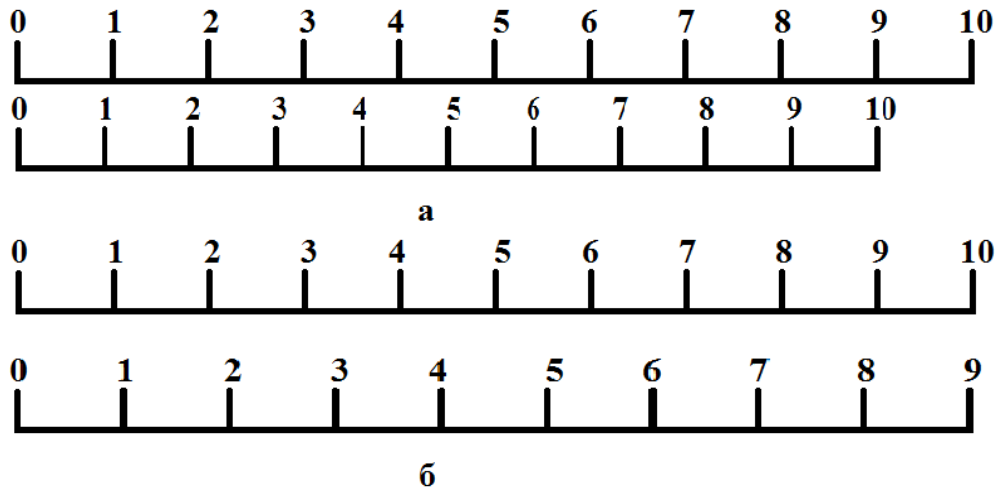


Рис. 4. Сравнение шкалы обычного пониуса и шкалы, используемой для преобразователя.

В цифро-аналоговых преобразователях такая шкала должна формироваться из двух наборов резисторов, каждый из которых делит одно и то же напряжение на разное количество делений и, получив разницу между ними по определенной кодовой комбинации обоих наборов, определяется выходное напряжение. Однако, в результате поочередного вычитания напряжений обоих наборов резисторов, не удастся определить полную линейную шкалу выходного напряжения в силу того, что общая шкала состоит из произведения количества делений обеих шкал, полученных из резистивных делителей напряжения, а поочередное вычитание даст всего значений:

$$N = \frac{(m+1) \cdot (n+1)}{2} , \tag{2}$$

где  $m$  и  $n$  ( $m = n \pm 1$ ) количество резисторов в первом и втором наборе резисторов соответственно или используя правило суммы с комбинаторного анализа

$$N = \sum_{i=1}^n i , \tag{3}$$

где  $n = m + 1$ .

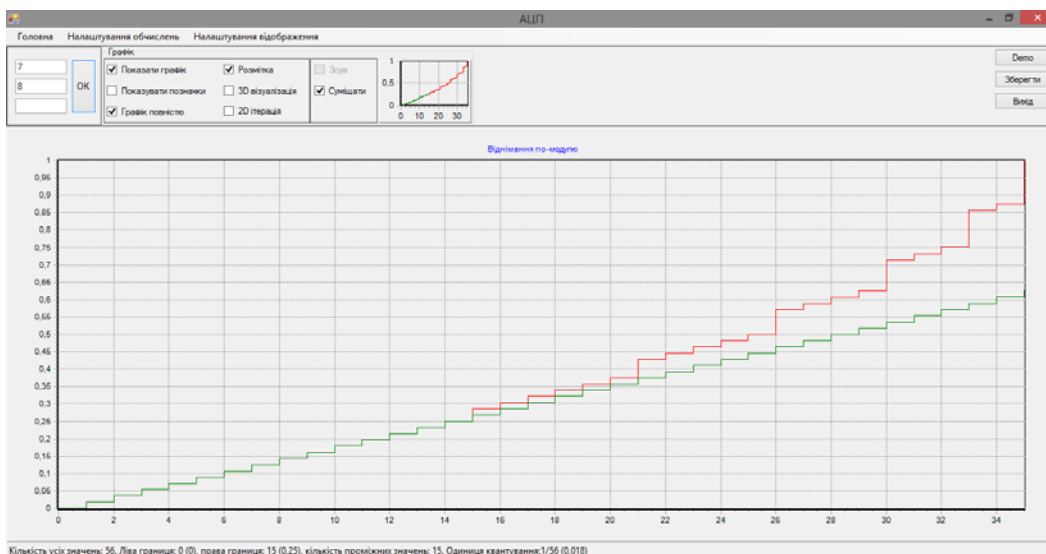


Рис. 4. Пример нелинейности значений шкалы, построенной из двух вспомогательных шкал с количеством делений 7 и 8

Единица квантования  $q$  при этом будет равна:

$$q = \frac{1}{mn} . \tag{4}$$

Очевидно, что общее количество потенциальных делений полной шкалы больше (2), поэтому определенное количество значений остается пропущенными. График такой шкалы изображен на рис. 4.

Верхняя шкала отклонилась в силу своей нелинейности — пропускаются определенных значений при ее определении — от нижней, эталонной шкалы. Однако это можно исправить, определив пропущенные значения. Подробнее алгоритм поиска таких значений описывается в [7].

Основной сложностью будет определение нужного цифрового кода для подачи на вход ЦАП, чтобы получить правильное выходное напряжение. Однако это решается исследованием распределения самих значений разностной матрицы напряжения относительно исходных значений каждого резистивного делителя напряжения.

Так же возможен вариант отыскания пропущенных значений применив не только метод, который описан в [7], где за основу берется вычитание показателей делителя, а наоборот — их сумму. Такой метод поможет не только упростить логику ЦАП, но и, в некотором роде, увеличит саму амплитуду возможности формирования выходного напряжения в два раза, но с гораздо меньшей точностью. Такой вариант будет лучше исследован в дальнейшем для формирования шкалы.

### Выводы

Выходя из выше сказанного можно сделать следующие выводы:

- 1) при создании шкалы по методу нониуса изначально видны преимущества — шкала становится значительно точнее;
- 2) однако появляются пропуски некоторых значений в виде нелинейности;
- 3) нелинейности такого рода можно устранить, используя уже известный алгоритм;
- 4) исследуется возможность определения нужного цифрового кода для подачи на вход ЦАП, чтобы получить правильное выходное напряжение;
- 5) планируется исследовать и другие варианты борьбы с возникающей нелинейностью в ходе построения шкалы.

Таким образом, теоретически возможно представить ЦАП с более точной шкалой. Для этого достаточно иметь два цуговых ЦАП, количество градаций которого будет отличаться на единицу. Возникнувшую нелинейность в шкале можно предупредить на логическом и техническом уровнях.

В результате создания преобразователя со шкалой такого типа дифференциальная нелинейность теоретически ухудшится примерно в два раза, но зато количество ключей и резисторов уменьшится в геометрической пропорции. На данный момент про преимущества и недостатки можно говорить лишь в теоретическом разрезе. Но опираясь на подобию построения шкалы этого ЦАП с цуговым, можно прогнозировать некоторые статические и динамические характеристики. А так же планируется смоделировать работу такого преобразователя и создать рабочий прототип.

### Литература

1. Классификация ЦАП [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://elteh-student.com/klassiikatsiya\\_tsap\\_17\\_36.html](http://elteh-student.com/klassiikatsiya_tsap_17_36.html)
2. Kester W. Analog-digital conversion / W. Kester. Analog Devices, Inc. — USA. — 2004. — 1138 p.
3. Научная библиотека. Справочник по цифровой схемотехнике [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://alnam.ru/book\\_spre.php?id=55](http://alnam.ru/book_spre.php?id=55)
4. Гуляс О. Й. Вимірювання постійної напруги методом коінциденції / О. Й. Гуляс, О. П. Войтюк, І. В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Електротехнічні та радіотехнічні вимірювання. — 2011. — № 1. — С. 89 — 93.
5. Варешко В. А. О возможности линеаризации равномерной шкалы для АЦП прямого преобразования с использованием двух наборов резисторов / В. А. Варешко // Международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов”. — Пенза, 2012. — С. 91 — 100.
6. Нониус [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нониус>
7. Варешко В. О. Повна лінійна шкала для вимірювальних перетворювачів інформації із використанням двох допоміжних шкал з різними одиницями квантування / В. О. Варешко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2014. — № 5. — С. 100 — 109.

### References

1. [http://elteh-student.com/klassiikatsiya\\_tsap\\_17\\_36.html/](http://elteh-student.com/klassiikatsiya_tsap_17_36.html/)
2. Kester W. Analog-digital conversion / W. Kester. Analog Devices, Inc. USA, 2004, 1138 p.
3. [http://alnam.ru/book\\_spre.php?id=55](http://alnam.ru/book_spre.php?id=55)
4. Hulyas O. Y. Measuring constant voltage method of coincidence / O. Y. Hulyas, O. P. Voytyuk, I. V. Trotsyshyn // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences, 2011, Issue 1, pp. 89 — 93.
5. Varesko V. O. Possibilities linearization uniform scale for ADC direct conversion using two sets of resistor / V. O. Varesko // International scientific-practical conference “Actual problems of engineering in the field of industry, environment and protection of water resources”, Penza, 2012, pp. 91 — 100.
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нониус>
7. Varesko V. O. Complete linear scale for information measuring converter by using two supplementary scales with different quantization units, Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences, 2014, Issue 5, pp. 100 — 109.

Рецензія/Peer review : 23.1.2015 p.

Надрукована/Printed :26.1.2015 p.



## ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 687.157-1

О.В. НАХАЙЧУК, Е.А. ЗАХАРОВА, В.П. ЯКУБОВИЧ

Вінницький інститут конструювання одягу і підприємництва

**РОЗРОБКА КОМПЛЕКТУ СПЕЦОДЯГУ ВІД ПРОМИСЛОВОГО  
ЗАБРУДНЕННЯ ДЛЯ ЗАПРАВНИКІВ АЗС**

*В даній статті представлений розроблений авторами метод підвищення якості спеціального одягу шляхом створення художньо-конструкторського рішення комплекту спецодягу для заправників АЗС. Описано використання захисного полімерного покриття для знімних накладок, яке захищає найважливіші ділянки чоловічого костюму від промислового забруднення, а оброблена тканина сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей матеріалу. Створена програма розрахунку залежності зміни розривного навантаження від кількості прання і температури, яка може бути використана для дослідження силових характеристик тканин з різними властивостями. Авторами запропонований метод підвищення зносостійкості тканини за рахунок нанесення захисного покриття для виготовлення знімних накладок спеціального одягу, з урахуванням умов його експлуатації.*

*Ключові слова: спецодяг, полімерне покриття, просочування, розривне навантаження.*

O.V. NAKHAYCHUK, E.A. ZAKHAROVA, V.P. YFKYBOVICH

Vinnytsia Institute of Clothes Designing and Entrepreneurship

**DEVELOPMENT OF THE SET FOR EMPLOYEES OF PETROL STATIONS FROM INDUSTRIAL POLLUTION**

*In this article it is presented the authors developed a method of improving the quality of working clothes by creating art and design solutions for a set of clothes for workers at the refuelling stations. It is described the using of protective polymer coating for removable linings that protects the most important parts of the male costume from industrial pollution and finished fabric improves performance properties of the material. Established program calculation of depending breaking load changes on the number of washing and temperature, which can be used to study the strength characteristics of fabrics with different properties.*

*The authors proposed a method of improving the durability of the fabric by applying a protective coating for the manufacture of removable linings of special clothing, taking into account the conditions of its operation.*

*Keywords: overall, polymer coating, seepage, breaking load.*

**Вступ**

Створення спеціального одягу на сучасному етапі – це складна задача, обумовлена різноманітністю умов, з якими стикається людина в процесі трудової діяльності. Нинішній технічний рівень підприємства потребує зниження шкідливих дій виробничого середовища, забезпечення безпечних умов праці, ліквідації професійних хвороб та виробничого травматизму. З розвитком промислового виробництва підвищуються вимоги до якості спеціального одягу, оскільки він повинен забезпечувати безпеку праці, запобігати дії шкідливих виробничих факторів, зберігати нормальний функціональний стан людини, її працездатність на протязі всього робочого часу, бути не токсичним, не викликати подразнюючої дії на організм працівника, витримувати науково обумовлені терміни експлуатації. Кожна професія представляє свої специфічні вимоги до спеціального одягу, які необхідно врахувати при його розробці [3].

На сьогоднішній день нафтогазова промисловість є однією із найпоширеніших у світі. Продукти нафтопереробки необхідні для «живлення» всіх виробничих процесів. Одним із основних видів розповсюдження цієї сировини являються бензоколонки, тому розробка методу підвищення якості одягу спеціального призначення для заправників, який сприяє безперешкодному виконанню професійних обов'язків та захищає працівників від забруднення різними видами масел є актуальним питанням. Виходячи з призначення спецодягу, до технології його виготовлення висуваються підвищені вимоги, перш за все, до міцності і довготривалості з'єднань. З'єднання деталей повинні мати заданий запас міцності і надійності.

У наукових працях багатьох авторів проведені дослідження процесу розробки одягу, які ґрунтуються на принципі забезпечення захисних і експлуатаційних властивостей. Проаналізувавши існуючий спецодяг, який використовують заправники АЗС, було виявлено, що він не відповідає необхідним вимогам. Тому важливим завданням є створення такого захисного одягу, який би відповідав усім потребам вказаних працівників.

**Експериментальна частина**

Для виявлення місць пошкодження була виконана топографія зносу існуючого спецодягу. Дослідження виконували у м. Вінниці на автозаправній станції фірми ТОВ «Назарет Транс», кількість костюмів спеціального одягу становить – 300 штук. Проаналізувавши експериментальні дані запропоновано художньо-конструкторське рішення чоловічого комплекту спецодягу (рис.1), який відповідає вимогам технічної естетики і своєму функціональному призначенню, а також естетичним, ергономічним та експлуатаційним вимогам, що ставляться до виробів даної групи. Комплект спецодягу складається з сорочки, брюк, знімного нагрудника, нарукавника та наколінника, які виготовлені з спецтканини, лицьова

поверхня якої покрита полімерним покриттям. Конструкція даного комплекту розроблена на основі типової базової конструкції чоловічої сорочки та класичних брюк. Сорочка прямого силуету з центрально бортовою застіркою на сім петель та гудзиків. Пілочка з двома зовнішніми накладними кишенями з пілозахисними клапанами, які застібаються на одну петлю та гудзик. На рівні третього гудзика кріпиться на кнопки знімний нагрудник. Нагрудник з двома кишенями: одна – накладна з пілозахисним клапаном, а інша – внутрішня, до входу якої кріпляться пришивна планка. Спинка з кокеткою. Рукави вшивні одношовні з накладною кишенею для мобільного телефону вище ліктя. Нижній зріз рукава оброблений пришивною манжетою. Для захисту від забруднення низу рукава проектується нарукавники, що доходять до області ліктя і кріпляться на кнопках, а низ стягнутий еластичною тасьмою. Комір відкладний, сорочкового типу.

Брюки прямого силуету 4-ох шовні з пришивним поясом. Застібка центральна потайна на тасьму-блискавку. На поясі розташовані п'ять хомутиків для просування ремня. На передніх половинках проектується дві бічні кишені, вхід яких оброблений обшивкою із спецтканини. Нижній зріз брюк оброблений відкладними манжетами, виготовленими з спецтканини, яка покрита полімерним покриттям. В області колін кріпляться за допомогою кнопок наколінники з кишенями на задній половинці дві виточки по одній з кожної сторони.



Рис.1. Загальний вигляд розробленого зразка спецодягу (вигляд спереду з знімними накладками та без них)



Рис.2. Загальний вигляд знімного нагрудника, нарукавника та наколінника

Основні переваги художньо-конструкторського рішення зовнішнього вигляду комплекту спецодягу:

- багатоваріантність експлуатації завдяки використанню знімного нагрудника, нарукавника та наколінника. Дані варіанти експлуатації спецодягу для заправників АЗС надають можливість підвищити гігієнічні, захисні властивості, а також покращити естетичний вигляд;
- нагрудник, нарукавник та наколінник виготовлені з спецтканини, лицьова поверхня якої

покрита полімерним покриттям, завдяки якому забезпечуються високі захисні властивості від шкідливих факторів виробництва (не пропускає бензин, мастила, бруду);

- нагрудник спроектований з двома кишенями: одна – накладна з пілозахисним клапаном, а інша – внутрішня, до входу якої кріпляться пришивна планка для підвищення функціональності виробу;
- наколінники спроектовані з кишенями для підвищення функціональності виробу;
- по низу нарукавника вставлена резинка, для придання щільного облягання нарукавника по лінії зап'ястя та зручності користування;
- манжети по низу брюк та вхід в бічну кишеню виготовлені з спецтканини з полімерним покриттям, завдяки чому ці ділянки попереджують забруднення (не пропускають бензин, мастила, бруд) та забезпечують високі захисні властивості.

Одяг спеціального призначення є засобом індивідуального захисту працівників від забруднення різними видами масел. Захисна здатність спецодягу визначається в більшості властивостями матеріалів, вибір яких повинен визначатися призначенням одягу і умовами його експлуатації. Тому було проведено ряд досліджень і розроблено суміш для нанесення на лицеву поверхню тканини. Для збільшення терміну експлуатації спецодягу розроблено полімерне покриття, що наноситься на лицеву поверхню матеріалу знімних накладок. Для утворення плівок полівінілового спирту було взято 5, 7 та 10% його розчин у воді. Для дослідних робіт вибрано тканину «Ортон». Наносили суміш в один, два, три шари. Сушили при температурі 50-60 °С в сушильній шафі. Температуру обрано до 100 °С, тому що може відбутися деградація полівінілового спирту. Час, протягом якого сушили – 30 хв. У якості пластифікатора було використано гліцерин.

Експериментальні дослідження включали як вивчення властивостей просочування тканин, так і встановлення силових факторів і деформаційних характеристик, згідно ГОСТ 17922-72 «Ткани штучные и изделия текстильные. Метод определения раздирающей нагрузки» на розривній машині РТ – 250М. Для дослідних робіт був використаний метод малих смужок, призначений для випробування на розрив зразків пробних смужок шириною 25 мм при затискній довжині 200 мм (ГОСТ 3812—72). Цей метод застосовують при випробуванні тканини і трикотажних полотен [1–3].

Встановлено, що один шар пропускає масла, а три шари утворюють жорстке покриття, тому було обрано два шари нанесення розчину. Дослідження показали, що найбільш оптимальним утворення плівок полівінілового спирту є 7% розчин у воді. Головною метою даних експериментів є визначення залежності зміни розривного навантаження (Рр, дН) тканини «Ортон» від концентрації полімеру (7%) при сушінні зразків t=60, t=80 та t=100 °С. За результатами експериментів були побудовані криві залежності зміни розривного навантаження тканини від концентрації полімеру.

При статичній обробці результатів дослідження була використана розрахункова система MathCad, розроблені прикладні програми розрахунку залежності зміни розривного навантаження  $F_p$  від кількості прання і температури. Загальна формула має вигляд:

$$F_p = K_1 \cdot t^{K_2}, \quad (1)$$

де  $K_1, K_2$  – розраховувались як:

$$K_1 = A_1 \cdot t + B_1, \quad K_2 = A_2 \cdot t + B_2. \quad (2)$$

В формулі (2) коефіцієнти  $A_1, B_1, A_2, B_2$  залежать від індивідуальних властивостей тканини, в таблиці 1 приведені їх значення для тканини “Ортон” за основою і за утком.

Таблиця 1

## Розрахункові значення коефіцієнтів

	$A_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$
За основою	-0,567	183	$2,575 \cdot 10^{-3}$	-0,119
За утком	-0,05	36	$9,689 \cdot 10^{-4}$	0,03

Графіки залежності зміни розривного навантаження (Рр, дН) тканини “Ортон” від концентрації полімеру (С., 7%), кількості прання і температури представлені на рис. 3.

Експерименти показали, що для підвищення міцності тканин спеціального призначення, терміну експлуатації спецодягу необхідно підвищити захисні властивості як тканин, так і одягу в цілому. Вирішити це питання можна шляхом використання спеціальної обробки тканин органічними і неорганічними матеріалами. Отже, головні зусилля були спрямовані на створення захисних та експлуатаційних властивостей, якими має володіти тканина для спецодягу. З цієї метою було розроблено захисне покриття із полімерного розчину, основою якого є полівініловий спирт та пластифікатор. В результаті нанесення такого розчину на поверхню матеріалу утворюється плівка, що стійка до дії забруднювачів та прання.

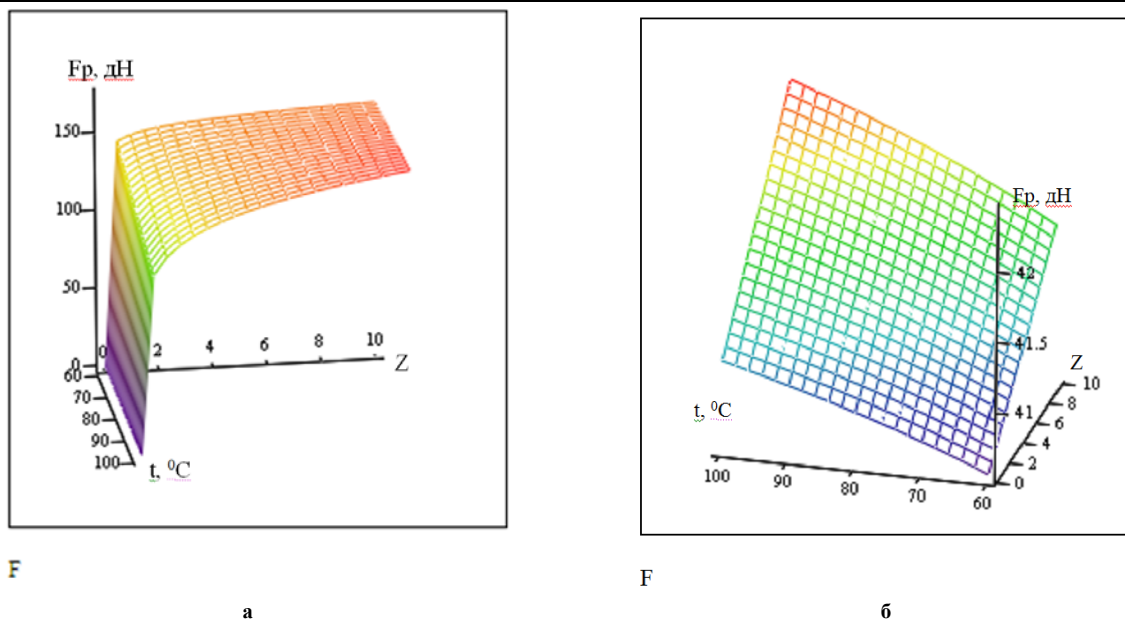


Рис. 3. Графік залежності зміни розривального навантаження ( $F_p$ , дН) тканини „Ортон” (за основою (а) та утком (б)) від концентрації полімеру ( $C$ , 7 %), кількості прання і температури

### Висновки

В ході дослідження міцності матеріалу на розрив та аналізуючи результати досліджень, можна зробити висновки, що відносне розривне навантаження значно зростає після нанесення на тканину полімерного покриття, що, в свою чергу, вказує на міцні міжмолекулярні зв'язки полімеру. Експериментально-аналітичне дослідження показали, що обробка тканини полімерним покриттям сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей матеріалу, серед яких важливе місце займає міцність спецодягу.

Основні технічні та техніко-економічні вимоги, якісні і кількісні показники, які були досягнуті в процесі виконання роботи – це довговічність експлуатації спецодягу для заправників, яка збільшилась приблизно в два рази порівняно з раніше існуючим. Представлені дослідження виконані на високому науково-експериментальному рівні і можуть бути рекомендовані для впровадження у виробництво чоловічого костюму (сорочки та брюк) спеціального призначення у виробництво.

### Література

1. Бузов Б.А. Материаловедение швейного производства / Бузов Б.А. – М. : Легпромгостиздат, 1986. – 424 с.
2. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров / Воюцкий С.С. – Л. : Химия, 1969. – 336 с.
3. Русинова А.М. Производственная одежда / Русинова А.М., Доценко Г.И., Гурович К.А. – М., 1987.

### References

1. Buzov B.A. Materials Science of garment production. M. : Light State Publishing House, 1986. 424 p.
2. Voiutskiy S.S. Physic-chemical basis of soaking and impregnating fiber systems by aqueous polymer dispersion. L. : Chemistry, 1969. 336 p.
3. Rusinov A.M., Dotsenko G.I., Gurovich K.A. Manufacturing clothing. M., 1987.

Рецензія/Peer review : 13.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: к.п.н., проф. Мізрах А.А.

В.А. ОТРОШКО

Чернігівський національний технологічний університет  
О.Р. МОКРОУСОВА, Н.В. МЕРЕЖКО  
Київський національний торговельно-економічний університет

## ВПЛИВ ПОЛІМЕРНО-МІНЕРАЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ НА ТЕМПЕРАТУРОСТІЙКІСТЬ КОЛАГЕНУ

*Стаття присвячена вивченню впливу полімерно-мінеральної композиції та її складових на структурування желатину. В якості мінеральної складової використано природний мінерал монтморилоніт, полімерна складова представлена акриловою емульсією МБМ-3. Проведено ряд дослідів для визначення температуростійкості систем, що містили окремо мінеральну складову, полімерну складову та їх композицію. Встановлено позитивний вплив складових та композиції на температуростійкість желатину. Отримано оптимальні значення відсоткового вмісту кожного компоненту.*

*Ключові слова: полімерно-мінеральна композиція, матеріали, температуростійкість, колаген.*

V.A. OTROSHKO

Chernigiv National Technological University  
O.R. MOKROUSOVA, N.V. MEREZHKO  
Kyiv National University of Trade and Economics

### EFFECT OF POLYMER-MINERAL COMPOSITION AND ITS COMPOUNDS ON TEMPERATURE STABILITY OF COLLAGEN

*Abstract - The article is devoted to the study of the influence of polymer-mineral composition and its components on the structuring of gelatin. As the mineral component was used natural mineral montmorillonite, as polymer component - acrylic emulsion MBM-3. To determine temperature stability were made series of experiments: systems contained separate mineral component, polymer component and its composition. The positive effect of the components and its composition on temperature stability of gelatin was proven. An optimal value percentage of each component were determined.*

*The combined use of mineral dispersions and acrylic polymer in the composition confirmed positive changes of collagen for its stabilization and improvement temperature stability as characteristic phenomena of effective formation of leather's structure. It was proved that the optimal value of the modified montmorillonite dispersions and acrylic polymer MBM-3 in the composition is 4-6% by weight of protein. The best changes of collagen structural achieved in the case of modification of montmorillonite with sodium polyphosphate.*

*Keywords: polymer-mineral composition, materials, temperature stability, collagen.*

#### Вступ

Натуральна шкіра завжди була цінним матеріалом для виробництва одягу, взуття, галантерейних виробів та ін. Технологічні процеси виробництва шкіри зі шкур тварин, серед яких можна виділити три окремі групи: підготовчі, дубильні та оздоблювальні, направлені на забезпечення якомога кращих властивостей готового матеріалу. Підготовчі процеси в основному направлені на формування пористої структури дерми. Процес дублення ж забезпечує фіксацію отриманої структури дерми та її стабілізацію (за рахунок утворення додаткових поперечних зв'язків між молекулами дубителя та колагеном). Остаточне формування властивостей натуральної шкіри відбувається протягом процесів рідинного та покривного оздоблення (додублювання, наповнювання, жирування, фарбування та ін.) [1].

В процесах додублювання та наповнювання шкіри використовується значна кількість хімічних речовин різноманітного призначення. В багатьох випадках ці речовини мають значну вартість, іноземне походження та низьку екологічну безпечність. Крім того, їх використання не завжди забезпечує бажаний результат. Саме тому пошук та розробка нових, екологічно безпечних та більш ефективних хімічних матеріалів для шкіряної промисловості є актуальним питанням.

#### Постановка завдання дослідження

Необхідність додублювання та наповнення шкіряного напівфабрикату пояснюється декількома причинами. По-перше, натуральній шкірі характерна така природна особливість, як нерівномірність за товщиною та щільністю по топографічним ділянкам. Це негативно впливає на розкрійні властивості матеріалу (збільшуючи відсоток відходів при розкрюванні) та властивості готових виробів зі шкіри. По-друге, додублювання та наповнювання дозволяє комплексно покращити фізико-механічні, деформаційні, гігієнічні властивості шкір.

Серед матеріалів для наповнювання шкіряного напівфабрикату значного поширення набули полімерні матеріали. Їх використання ефективно сприяє вирівнювання напівфабрикату за товщиною та щільністю. Практика використання лише полімерного наповнювача показує, що отримані шкіри мають низькі показники паро-, водо- та повітропроникності за рахунок склеювання волокон дерми.

Актуальним напрямком виробництва шкіри є поєднання полімерних та мінеральних сполук для наповнювання [1, 2]. Це дозволяє забезпечити м'якість, еластичність, об'ємний гриф лицьової поверхні, вирівнювання напівфабрикату за товщиною та щільністю.

Головною перевагою використання таких композицій є отримання шкіри з високими гігієнічними та

експлуатаційними властивостями [3]. Досягається це за рахунок утворення полімерно-мінеральної композиції у вигляді мікрокомпозиту (рис. 1, а) або інтеркаліативного композиту (рис. 1, б), тобто частинки мінералу, що характеризуються високою дисперсністю, проникаючи в структуру полімеру, розподіляються в його об'ємі, тим самим перешкоджаючи склеюванню полімеру та волокон дерми.

Пояснити позитивний вплив природних мінералів на формування дерми напівфабрикату можна лише розуміючи всі фізичні та хімічні властивості мінералів.

В класичній кристалографії прийнято вважати, що найдрібнішою одиницею мінералів є елементарний осередок, причому йому властиві майже всі характеристики макрокристалу [4]. Попри це елементарна комірка має в своєму складі більш дрібні об'ємні одиниці, що отримали назву доменів або кластерів, і зазначені кластери не володіють кінцевими властивостями кристалів. Кластери, розташовуючись в просторі певним чином, можуть створювати нову речовину з властивостями, що різко відрізняються від стандартів. Відповідно до цього, шляхом маніпуляції цими наноб'єктами (із застосуванням спеціальних технологій) можна створювати нові матеріали та конструкції.

Основним мінералом бентонітових глин є монтморилоніт (сметит), якому притаманні майже всі властивості природних нанорозмірних частинок. Щоб забезпечити відповідність між природними наночастинками з штучними наноматеріалами (за своїми властивостями), необхідно використовувати бентоніт високої якості з вмістом монтморилоніту 85–95%.

Структура монтморилонітів шарувата (рис. 2). Для монтморилоніту співвідношення тетраедричних та октаедричних сіток в шарі 2:1. Зазвичай шари складаються з окисноалюмінієвих або силікатних пластин, які в свою чергу з'єднуються між собою в стопки - так звані тактоїди [5].

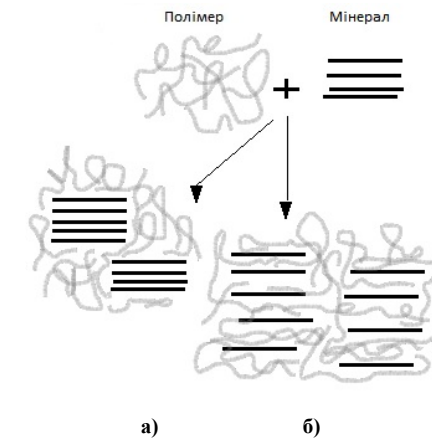


Рис. 1. Схема можливої взаємодії полімеру та мінералу в композиції

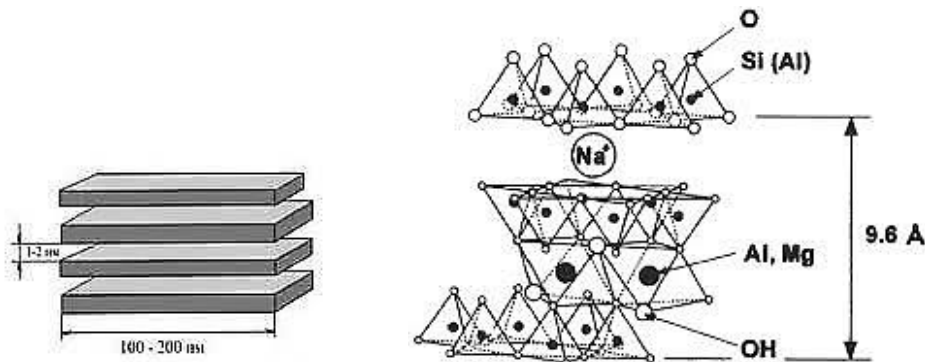


Рис. 2. Шарувата структура монтморилоніту

Між талькоподібними силікатними шарами монтморилоніту розташовується вода. Крім води між силікатними шарами, в структурі монтморилоніту містяться обмінні катіони (рис. 2), що мають деякий від'ємний заряд [6].

Здатність до самодиспергації – дуже важлива властивість монтморилоніту [7], адже в процесі диспергації є можливість виникнення незавершених структурних елементів, які можна розглядати як наночастинки або своєрідний плейтлет (кластер). Розміри елементарних кластерів в ширину та довжину варіюють від декількох десятків до декількох сотень нанометрів, а завтовшки від 1 до 1,5 нм. Точна товщина залежить від числа адсорбованих молекул води. Ізоморфні заміщення в октаедричному і тетраедричному шарах значною мірою визначають від'ємний заряд, що несуть елементарні кластери. Нейтралізується заряд обмінними катіонами з одним або двома однойменними шарами води, що розташовуються в міжшаровому просторі між елементарними кластерами. Саме ступінь впорядкованості кристалічної структури, кількість заміщених катіонів у шарі та характер міжшарового комплексу головним чином визначають хімічні та структурно-механічні властивості бентонітів і особливості його будови. Певну роль у прояві властивостей відіграє також природа обмінних катіонів.

В результаті занурення в воду глинисті частинки, як групи елементарних кластерів, здатні набухати в результаті входження води в міжшаровий простір. Відповідно, існує можливість трансформування глинистих частинок у водну суспензію. Важливою властивістю кластерів і, відповідно, глинистих частинок є здатність до самоорганізації. Як наслідок самоорганізації суспензії набувають певної структури.

Щоб значною мірою вплинути на властивості поверхні мінералів монтморилонітової групи, достатньо для модифікування поверхні використати певні обмінні катіони (наприклад, з метою підвищення гідрофільності це можуть бути  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ).

Враховуючи структурні та зарядні показники модифікованих мінеральних дисперсій, передбачено можливість успішного та ефективного їх використання в складі полімерно-мінеральної композиції для

наповнювання. Завдяки своїй полідисперсності, гідрофільності, адсорбційній та іонообмінній здатності, а також анізотричній формі частинок, модифіковані дисперсії монтморилоніту у поєднанні з дією акрилових полімерних наповнювачів можуть надавати шкірі ряд цінних фізико-хімічних і гігієнічних властивостей.

Мета роботи полягала у вивченні впливу полімерно-мінеральної композиції та її складових (з різними варіаціями відсоткового складу) на структурування колагену дерми.

### Об'єкти та методи дослідження

За основу для отримання мінерально-полімерної композиції в процесі досліджень взято бентонітову глину (місце походження – Дашуковське родовище Черкаської області). Для створення полімерно-мінеральної композиції використано модифіковану дисперсію основного мінералу бентонітових глин – монтморилоніту ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). В результаті заміни іон-обмінного комплексу на іон натрію монтморилоніт утворює високостабільні у часі дисперсії. Тому для модифікації монтморилоніту використано:

- карбонат натрію (ГОСТ 2156-76) – хімічна формула  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Біла тверда речовина. Природна форма – мінерал нахколіт.

- поліфосфат натрію (ГОСТ 20291-80) – хімічна формула  $(\text{NaPO}_3)_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Біла тверда, гігроскопічна речовина.

Модифікація дисперсії монтморилоніту проведена обробкою його водної дисперсії карбонатом натрію в розрахунку 5% від маси сухого мінералу та поліфосфатом натрію в розрахунку 10%.

В якості полімерної складової обрано емульсію аніонного типу МБМ-3 (ТУ 6-01-186-89) – водну дисперсію продукту сополімеризації метилметакрилату, бутилакрилату та метакрилової кислоти (в кількості 3% від маси інших мономерів) (табл. 1).

Таблиця 1

### Технічні характеристики МБМ-3

Зовнішній вигляд	Молочно-біла рідина
Масова частка сухого залишку, %	36-42
pH	5 – 7
Стійкість до дії NaCl	Стійка
Масова доля карбоксильних груп в перерахунку на метакрилову кислоту, %, не більш ніж	4,0
Поверхневий натяг, мН/м	35 – 41
Механічні властивості вільних плівок	
а) міцність при розриві, МПа	1 – 3
б) відносне видовження, %	1000 – 1600

Полімерно-мінеральну композицію отримано шляхом введення акрилового наповнювача (при механічному перемішуванні зі швидкістю 500 об/хв.) в модифіковану дисперсію монтморилоніту (тривалість перемішування 1 год. за температури 20°C). Дану композицію використовуємо для наповнювання.

Для дослідження можливих взаємодій мінеральної композиції і колагену використано желатин (ГОСТ 11293-89), безбарвний гідролізований білок колагену. Желатин дуже подібний до колагену шкіри за амінокислотним та елементарним складом, тому за змінами його властивостей можна прогнозувати зміни колагену шкіри. Для проведення досліджень було приготовано 5-відсотковий розчин желатину, в який введено досліджувані компоненти. Для хромування желатину обробляли його оксидом хрому в кількості 0,5% від маси білка.

В аналізі отриманих результатів використано наступні скорочення: Ж – нативний желатин; МДМк – модифікована дисперсія монтморилоніту карбонатом натрію; МДМп – модифікована дисперсія монтморилоніту поліфосфатом натрію; ХрЖ – хромований желатин; АП – акрилова емульсія МБМ-3; ПМКк – полімерно-мінерально композиція МБМ-3 та модифікованої дисперсії монтморилоніту карбонатом натрію; ПМКп – полімерно-мінерально композиція МБМ-3 та модифікованої дисперсії монтморилоніту поліфосфатом натрію.

Вплив дослідних композицій на структурні перетворення дерми досліджено аналітичним методом визначення температури плавлення желатину. Експеримент складався з трьох серій. В першій серії було визначено температуру плавлення трьох дослідних систем: Ж+МДМп, Ж+МДМк та Ж+АП, при чому витрати складових полімерно-мінеральної композиції, а саме – МДМ (в перерахунку на сухий мінерал) та АП (в перерахунку на сухий залишок) від маси желатину становили, %: 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10.

Через те, що досліджувані композиції пропонується використовувати для наповнювання шкір, тобто в циклі післядубильних процесів, необхідно враховувати, що на наповнювання надходить дублений хромовими сполуками напівфабрикат, який характеризується утвореними координаційними зв'язками з комплексами хрому (III). Для точного відтворення послідовності технологічного процесу було проведено той же експеримент, але з використанням хромованого желатину. Всі витрати дослідних компонентів аналогічні попередньому експерименту (друга серія дослідів): ХрЖ+МДМп, ХрЖ+МДМк та ХрЖ+АП. Третя серія дослідів була направлена на вивчення комплексного впливу полімерної та мінеральної

складових на структурування хромового желатину. Відсоткові витрати полімерної та мінеральної складових від маси білка в дослідних системах склали відповідно, %: 4:4, 6:6, 4:6, 6:4.

### Результати та їх обговорення

Зміна температури плавлення желатину показує, що відбулися процеси, які вплинули на його внутрішню структуру. Підвищення температури плавлення в результаті модифікації свідчить про більшу стабілізацію та стійкість желатину до підвищених температур, що є результатом утворення додаткових зв'язків в системі. Відповідно й колаген натуральної шкіри модифікований таким же чином матиме вищу температуру зварювання, а це важливий показник якості готової шкіри.

Результати першої серії досліджень представлені на рисунку 3.

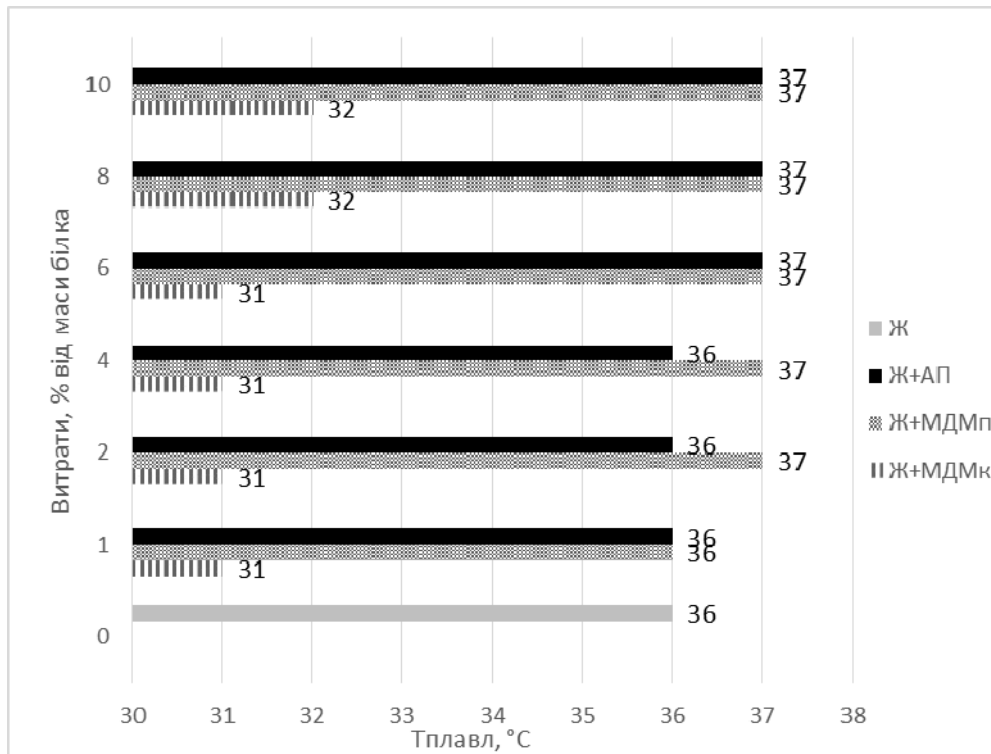


Рис. 3. Залежність температури плавлення дослідних систем від витрат мінеральних дисперсій та акрилового полімеру

Результати досліджень вказують на те, що обробка желатину модифікованими дисперсіями монтморилоніту та акриловим полімером впливає на гідротермічну стійкість колагену. Вид натрієвої солі, використаний для модифікації монтморилоніту, суттєво впливає на поведінку желатину після взаємодії з МДМ.

У випадку використання МДМк з витратою від 1 до 6 % від маси білка температура плавлення желатину знижується майже з 36 °C до 31 °C, тобто на 14 %. Підвищення витрат МДМк до 8–10 % підвищує температуру плавлення не суттєво – до рівня 32 °C. Результати використання для модифікації МДМп мають протилежні наслідки: при витратах мінералу вище 2 % від маси білка відбувається підвищення температури плавлення (порівняно з даним показником нативного желатину) до рівня 37 °C.

Серед результатів взаємодії МДМк з желатином при низьких витратах можна виділити наступні структурні ефекти: відбувається ізоляція макромолекули колагену мінеральними частинками та частково зникає взаємодія між ними; спостерігається «диспергація» окремих рівнів колагену мінеральними частинками; структура колагену на різних розмірних рівнях будови упорядковується (рис. 1). Зазначені взаємодії пояснюють зафіксоване зниження температури плавлення желатину після обробки МДМк. Крім того, існує ймовірність впливу рН дисперсій МДМк (8,5-9,0), адже це може спровокувати часткове руйнування білкової системи желатину. Подальше підвищення витрат МДМк вже не диспергує макромолекули білка, а частково структурує, що і проявляється в підвищенні температури плавлення.

Деяко інша залежність спостерігається при використанні поліфосфату для модифікації монтморилоніту. На відміну від карбонату натрію, поліфосфат натрію має довгу лінійну структуру, яка повністю не входить у міжшаровий простір мінералу. Як результат взаємодії з'являється можливість утворення містка «Монтморилоніт – Поліфосфат натрію – Білок». А отже можна прогнозувати утворення більш структурованої системи. Проте, зважаючи на наявність лише водневих зв'язків та відсутність хімічних, зазначена «фіксація» не є стабільною для підвищення температури плавлення, хоча і спостерігається збільшення даного показника на 1 °C. В цілому, отримуємо більш гнучку, ніж у першому випадку систему.

Подібне структурування системи за принципом «Монтморилоніт – МБМ-3 – Білок» спостерігається



при введенні акрилового полімеру у желатин.

Результати другої серії дослідження представлені у вигляді гістограми (рис. 4).

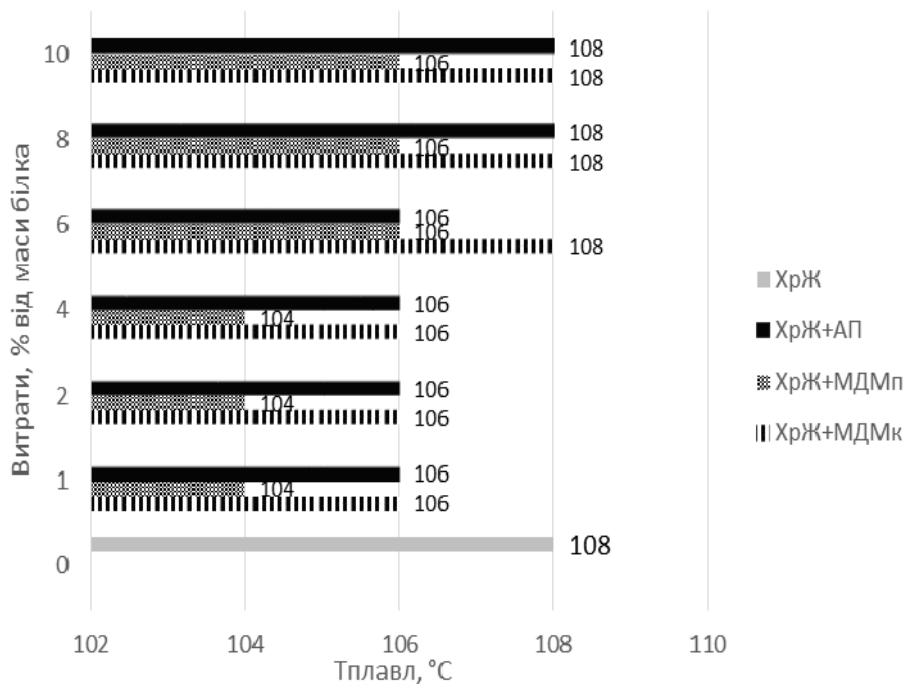


Рис. 4. Залежність температури плавлення хромованих дослідних систем від витрат мінеральних дисперсій та акрилового полімеру

Після обробки хромованого желатину дисперсіями МДМк та МДМп спостерігається зміна температуростійкості «білкової системи». На представленій гістограмі можна виділити дві зони: перша – зміна температури плавлення при використанні реагентів в кількості 1-4 % від маси білка, друга – 6-10 %. Можна припустити, що перша зона пов'язана з процесом диспергування хромованої желатини, а друга – з участю МДМ у комплексоутворенні в білковій системі.

Результатом введення МДМк та МДМп у кількості від 1 % до 4 % є незначне зменшення температури плавлення. При використанні МДМп рівень зниження температури плавлення до 104 °C більший, що становить 3,7 %, а в разі використання МДМк – 106 °C.

Особливість взаємодії МДМ з хромованим желатином полягає в тому, що частинки монтморилоніту здатні «відтягувати» на себе іони хрому, які фіксують білок, і одночасно змінювати стабільність білкової структури. Причиною цього є висока питома поверхня мінеральних частинок в МДМ та висока здатність до катіонного обміну з хромовими комплексами. Тобто відбувається «конкурентна боротьба» за взаємодію зі сполуками хрому між колагеном і мінералом. Це теж може спричинити незначне зниження температури плавлення хромованого білка. Враховуючи більший рівень диспергування мінеральних частинок в разі використання поліфосфату натрію, можна передбачити більший диспергуючий ефект МДМп на білкову систему.

Збільшення витрат МДМк (до 6-10 %) сприяє структуризації білкової системи з утворенням взаємодій «МДМк – Хром – Білок» за рахунок інших закономірностей, чим і пояснюється підвищення температури плавлення желатину. Дуже важливим для аналізу є значення рН мінеральної дисперсії. Рівень рН модифікованих дисперсій дорівнює 5,0 для МДМп та 8,5 для МДМк. Оскільки при підвищенні рН від 3,5 до 6,9 збільшується здатність хромових сполук до комплексоутворення [8], збільшення вмісту МДМ з вищим рівнем рН сприяє посиленню комплексоутворення хрому в білковій системі, що проявляється в підвищенні температури плавлення. Рівень рН в системах: «Ж–МДМк» – 4,5 од., а «Ж–МДМп» – 4,0. Отже, чим більше рН в системі, тим більше структурування колагену за рахунок комплексоутворення з хромом. Що стосується використання МБМ-3, то поява додаткових карбоксильних груп в складі акрилового полімеру при витратах МБМ-3 вище 8 % від маси білка, сприяє ефективній стабілізації білка через появу додаткових зв'язків хромових комплексів з карбоксильними групами МБМ-3: «МБМ-3–Хром–Білок».

Отримані результати вказують на позитивний вплив використання МДМ та МБМ-3 щодо стабілізації структури хромованого желатину. Оптимальними витратами останніх можна вважати 4-6 % від маси білка для МДМ та 6-8 % для МБМ-3. Найкращі структурні перетворення відповідають використанню МДМп, що і буде враховано надалі.

Третя серія дослідів виконувалась для визначення сумарного впливу композиції на термостійкість нативного та хромованого желатину. Для обробки желатину використовуємо полімерно-мінеральну композицію на основі модифікованих дисперсій монтморилоніту та МБМ-3, відсотковий вміст складових складає 4 % та 6 % в різних варіаціях. Результати експерименту представлені на рисунках 5, 6.

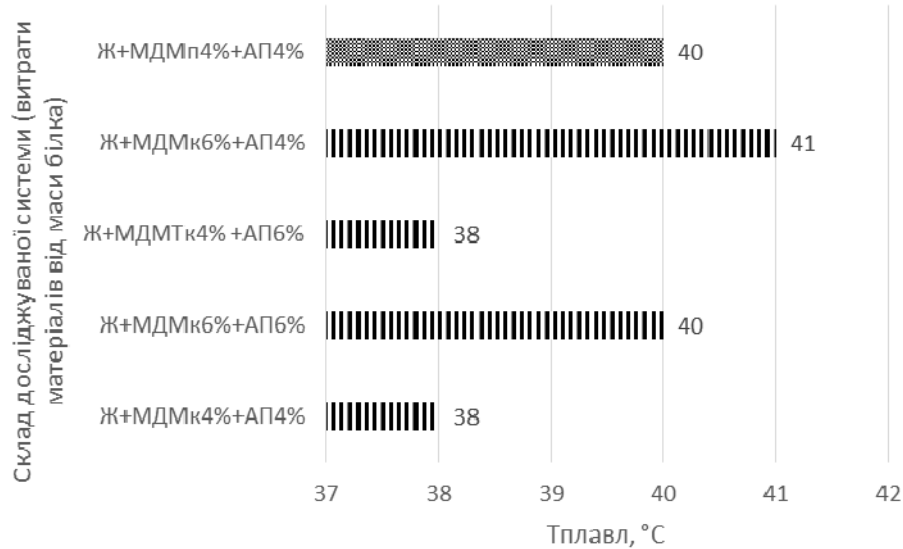


Рис. 5. Температура плавлення контрольних варіантів дослідних систем

На рисунку 5 відсутні значення температури плавлення для дослідних систем, в яких витрати компонентів МДМп та АП складають відповідно, %: 6 та 6, 4 та 6, 6 та 4. Пояснюється це стабільністю температуростійкості в цих системах – у всіх випадках значення складо 40 °С.

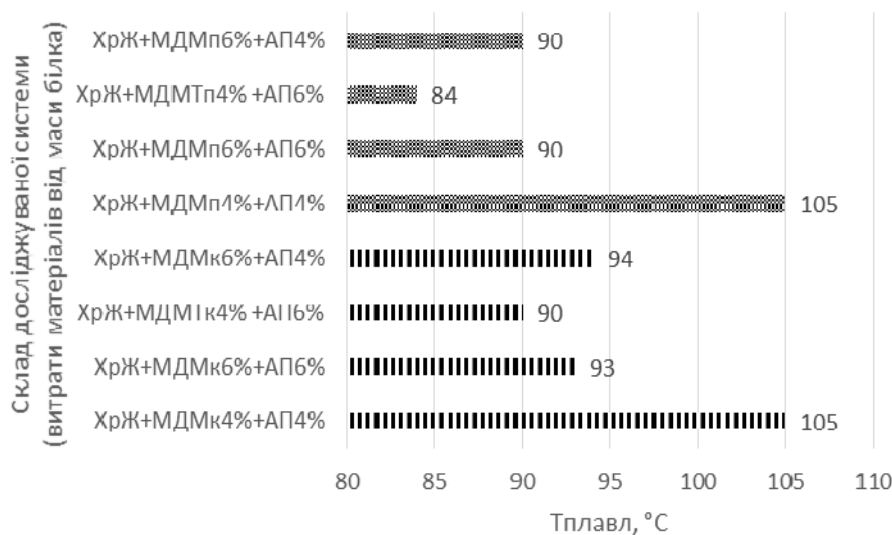


Рис. 6. Температура плавлення контрольних варіантів хромованих дослідних систем

Аналіз досліджень дає можливість зробити висновок, що використання полімерно-мінеральних композицій для стабілізації колагену, як основи структури шкіри, є ефективним, про що свідчить підвищення температуростійкості модифікованого колагену. Виходячи з результатів дослідження, раціональним в складі полімерно-мінеральної композиції є співвідношення МДМ та полімеру 1:1 або 1,5:1 відповідно. При цьому витрати МДМ та АП від маси білка становлять 6 % та 4 %. Отримані результати будуть враховані при розробці оптимальних варіантів наповнювання шкіряного напівфабрикату розробленою полімерно-мінеральною композицією.

**Висновки**

В результаті проведених досліджень проаналізовано вплив полімерно-мінеральної композиції та її складових на температуростійкість колагену. В якості модельного препарату використано нативний і хромований желатин.

Показано, що застосування модифікованих натрієвими солями дисперсії монтморилоніту та акрилового полімеру впливає на температуростійкість як нативного, так і хромованого колагену. Характер змін в разі застосування дисперсій монтморилоніту залежить від виду модифікатора та витрат мінералу від маси білка. Встановлено, що при застосуванні для обробки нативного желатину модифікованих карбонатом натрію дисперсій монтморилоніту при витратах до 6 % мінералу від маси білка відбувається зниження температури плавлення желатину через ймовірне диспергування білкової системи, тоді як збільшення витрат мінеральної дисперсії до 8–10 % мінералу сприяє структуруванню колагену. Виявлено, що застосування модифікованих поліфосфатом натрію дисперсій монтморилоніту при витратах вище 2 %

мінералу від маси білка сприяє стабілізації колагену, що підтверджено зростанням температури його плавлення, хоча і незначним. Аналогічний вплив характерний при застосуванні акрилового полімеру. Виявлені зміни можуть відбуватись за рахунок утворення додаткових зв'язків в системах «Монтморилоніт-МДМ-Білок» та «Монтморилоніт-АП-Білок».

Показано, що найбільш суттєві зміни в термостійкості колагену відбуваються, після обробки його хромованої форми мінеральними та полімерними дисперсіями при різних витратах останніх. Після введення модифікованих дисперсій монтморилоніту в хромований желатин при витратах мінералу 1–4 % спостерігається зниження температуростійкості колагену через ймовірну взаємодію катіонів хрому з високорозвиненою сорбційною поверхнею мінералу. Збільшення витрат модифікованих карбонатом натрію дисперсій монтморилоніту (до 6–10 %) сприяє структуруванню колагену з утворенням додаткових зв'язків «МДМк – Хром – Білок», що підтверджується зростанням температури плавлення хромованого колагену.

Суміщене використання мінеральних дисперсій та акрилового полімеру в складі композиції підтвердило позитивні зміни колагену щодо його стабілізації та підвищення температуростійкості, як характерних явищ ефективного формування структури натуральної шкіри. Доведено, що оптимальними витратами складових композиції можна вважати 4–6 % від маси білка для модифікованих дисперсій монтморилоніту та акрилового полімеру МБМ-3. Найкращі структурні перетворення колагену досягаються при модифікації монтморилоніту поліфосфатом натрію.

### Література

1. Грищенко І.М. Поліфункціональні шкіряні матеріали : монографія / І.М. Грищенко, А.Г. Данилкович, О.Р. Мокроусова ; за ред. А.Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2013. – 16 с.
2. Паламар В.А. Перспективність наповнювання шкіряного напівфабрикату полімерно-мінеральною композицією / В.А. Паламар, О.Р. Мокроусова // Тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції [«Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і наноконструктивів»], (Київ, 19-20 листопада 2013). – К. : КНУТД, 2013. – С. 47–48.
3. Мокроусова О. Р. Формування експлуатаційних властивостей шкіряних матеріалів мінеральними наповнювачами / О.Р. Мокроусова, С.А. Карван, О.П. Козарь // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 82–88.
4. Основи кристалографії [Електронний ресурс] / Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича. – 2006. – Режим доступу : [http://shron.chtyvo.org.ua/Fodchuk\\_Ihor/Osnovy\\_krystalohrafii.pdf](http://shron.chtyvo.org.ua/Fodchuk_Ihor/Osnovy_krystalohrafii.pdf)
5. Куковський Є.Г. Особливості будови та фізико-хімічні властивості глинистих мінералів / Є.Г. Куковський. – К. : Наукова думка, 1966. – 128 с.
6. Беррі Л.Г. Мінералогія / Л.Г. Беррі, Б.Г. Мейсон, Р.В. Дітріх. – М. : МИР, 1987. – 603 с.
7. Осипов В.І. Мікроструктура глинистих порід / В.І. Осипов, В.М. Соколов, Н.А. Румянцева. – М. : Надра, 1989. – 211 с.
8. Гороновский И. Справочник по химии / И. Гороновский, Ю. Назаренко, Е. Некряч. – Киев : Наукова думка, 1987. – 829 с.

### References

1. Grishchenko I.M., Danilkovich A.G., Mokrousova O.R. Polifunktionalniskiryanimateriali: monografiya, Feniks, Kiev, 2013, p.16
2. Palamar V.A., Mokrousova O.R. Perspektivnist napovnyuvannya shkiryanoogo napivfabrikatu polimerno-mineralnoy kompozitsiyu, Tezi dopovidey Vseukrainskoi naukovoї konferentsii ["Suchasni tehnologii oderzhannya kompozitsiynih materialiv, himichnih volokon i nanokompozitiv"], KNUUD, Kyiv, 19-20 listopada 2013, pp. 47-48.
3. Mokrousova O.R., Karvan S.A., Kozar O.P. Formuvannya ekspluatatsiynih vlastivostey shkiryanih materialiv mineralnimi napovnyuvachami, Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2014. –No. 2. - pp. 82-88.
4. Osnovi kristalohrafii: / Chernivetskiy natsionalniy universitet IM. Fedkovych – 2006. URL: [http://shron.chtyvo.org.ua/Fodchuk\\_Ihor/Osnovy\\_krystalohrafii.pdf](http://shron.chtyvo.org.ua/Fodchuk_Ihor/Osnovy_krystalohrafii.pdf)
5. Kukovsky E.G. Osoblyvosti budovy ta fizyko-chimichni vlastyosti hlynystyh mineraliv, Naukova dumka, Kiev, 1966, 128 p.
6. Berri L.G., Mason B.G., Ditrhi R.V. Mineralogiya, WORLD, Moscow, 1987, 603 p.
7. Osipov V.I., Sokolov V.M., Rummyantsev N.A. Mikrostruktura glinistih porid, Nadra, Moscow, 1989, 211 p.
8. Goronovsky I., Nazarenko Y., Nekryach E. Spravochnik po himii, Naukova dumka, Kiev, 1987, 829 p.

Рецензія/Peer review : 13.2.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Данилкович А.Г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО БЕЛЕНИЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНИ В КИСЛОЙ СРЕДЕ

В статье представлены результаты исследования возможности низкотемпературного беления хлопчатобумажной ткани в кислой среде с применением реактива Фентона. Изучено влияние типа кислотного агента на белизну и прочность отбеленной ткани. Также проведены исследования влияния pH белящего раствора, времени и температуры беления, концентрации пероксида водорода и катализатора на качество отбеленной ткани. В результате исследования установлено, что процесс беления хлопчатобумажной ткани при низкой температуре возможно проводить в кислой среде. Однако достигаемые высокие показатели белизны ткани могут сопровождаться падением прочности текстильного материала.

Ключевые слова: низкотемпературное беление, хлопчатобумажная ткань, кислотный агент, катализатор.

OLGA YAKOVLEVNA SEMESHKO

Kherson National Technical University

LESYA VASIL'EVNA PELYK

Lviv Academy of Commerce

### THE INVESTIGATE OF THE POSSIBILITY OF LOW-TEMPERATURE BLEACHING OF COTTON FABRICS IN AN ACID ENVIRONMENT

*Abstract – The results of investigating the possibility of low-temperature bleaching of cotton fabric in the acid environment using Fenton's reagent are presents in the article. Influence of type of the acid agent on a whiteness and strength of the bleached fabric are investigated. The researches of influence pH of the bleaching solution, time and temperature of bleaching, concentration of hydrogen peroxide and catalyst on quality of the bleached fabric are carried out too. As a result of research it is established, that process of bleaching of cotton fabrics at low temperature may be carried out in an acid environment. However reached high indicators of a whiteness of a fabric can be accompanied by a fall strength textile material.*

*Keywords: low-temperature bleaching, cotton fabric, acid agent, catalyst.*

#### Введение

Известно, что в отделочном производстве процесс беления при значении pH, смещенным в кислую сторону, используется для отбеливания шерсти, так как щелочь негативно влияет на волокна шерсти. Беление хлопчатобумажных текстильных материалов гипохлоритом натрия, хлоритом натрия и надуксусной кислотой происходит в нейтральной и слабокислой среде [1–5]. Однако в настоящее время хлорсодержащие отбеливатели практически не используются из-за высокой экологической нагрузки на окружающую среду и значительного ухудшения условий труда.

#### Анализ исследований и публикаций

На большинстве отечественных предприятий в качестве шликты используют натуральные крахмалы из-за их низкой стоимости по сравнению с искусственными полимерами. Для эффективного проведения процесса беления, а также для получения ровной окраски рекомендуется перед белением проводить операцию расшлихтовки. В случае полного перехода предприятия на низкотемпературную технологию процесс расшлихтовки и последующего беления может занимать несколько суток. Поэтому с практической точки зрения представляет интерес изучение возможности отбеливания хлопчатобумажных тканей в кислой среде, поскольку это позволило бы отказаться от проведения отдельной операции расшлихтовки, благодаря тому, что в кислой среде будет происходить гидролиз природного крахмала. Расшлихтовка, совмещенная с процессом беления, позволит повысить качество подготовки и сократить общую продолжительность процесса.

При смещении pH водного раствора пероксида водорода в кислую сторону, его устойчивость повышается, что делает процесс беления длительным и неэффективным. Для ускорения процесса беления в кислой среде используют катализаторы. С этой целью используют ферменты на основе каталазы, ионы металлов переменной валентности, либо лиганды, содержащие метал переменной валентности [6–8]. Наиболее доступными и дешевыми катализаторами разложения пероксида водорода в кислой среде являются соли металлов переменной валентности, которые катализируют его радикальный распад (рис. 1).

В химической технологии довольно широко используется реактив Фентона – водный раствор, содержащий перекись водорода, катализатор (соль железа) и стабилизатор (обычно серная или другая кислота). Реактив обладает сильным окислительным действием и способен разрушать многие органические соединений, в том числе природные и синтетические красители [9, 10].

#### Постановка задачи исследования

Учитывая доступность компонентов реактива Фентона, их низкую стоимость представляет интерес изучение возможности использования реактива при белении хлопкосодержащих текстильных материалов.

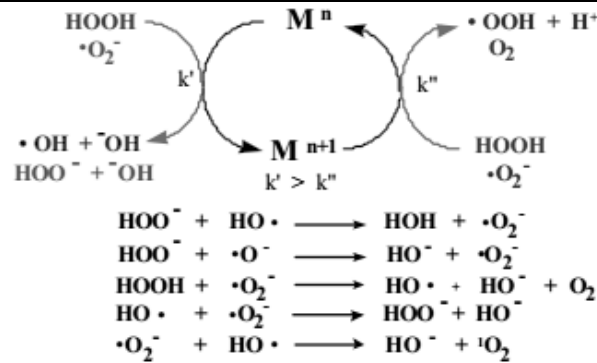


Рис. 1. Разложение пероксида водорода с участием ионов переходных металлов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Сдвинуть pH белящего раствора влево можно с помощью использования кислот или кислых солей. На первом этапе работы было исследовано влияние кислотного агента на качественные показатели отбеленной ткани и на кинетику процесса отбеливания. Технологический цикл обработки включал: пропитку белящим раствором, вылеживание в полиэтиленовом пакете в течение исследуемого временного интервала при температуре 30°C, промывку холодной водой, конвективную сушку при 120°C. Показателями качества белиния служили белизна, количество пероксида водорода, оставшееся на ткани при завершении процесса, прочность ткани. В качестве кислотного агента исследованы: серная кислота 2 г/л (вариант 1), смесь серной и уксусной кислоты по 1 г/л (вариант 2), уксусная кислота 2 г/л (вариант 3), щавелевая кислота 2 г/л (вариант 4), лимонная кислота 2 г/л (вариант 5) и кислый продукт, полученный при электрохимической активации воды – анолит с pH ~ 3 (вариант 6). Во всех вариантах обработки концентрация пероксида водорода составляла 40 г/л, FeSO<sub>4</sub> – 0,5 г/л, ПАВ – 0,1 г/л. Результаты исследования представлены на рис. 1.

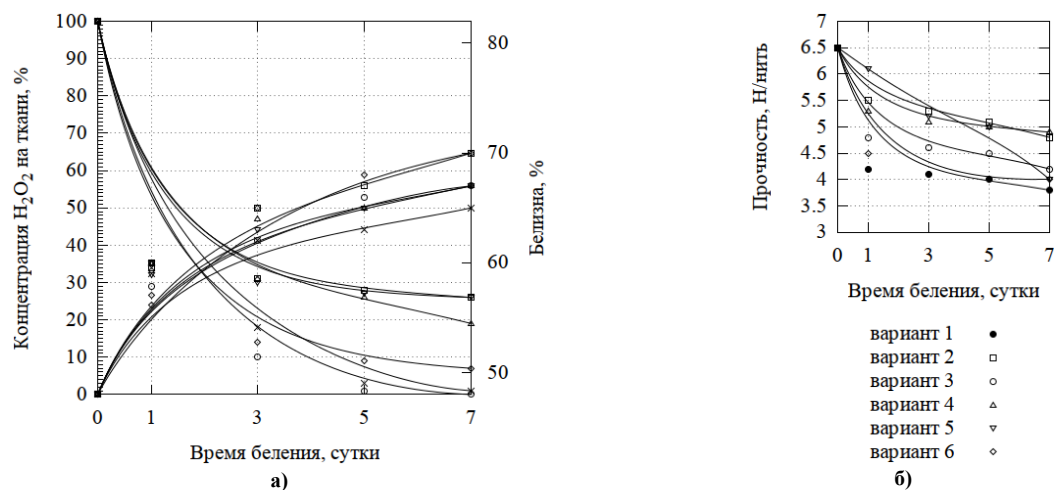


Рис. 1. Влияние вида кислотного агента и времени белиния на показатели качества отбеленной ткани:  
 а) белизна и количество оставшегося после белиния на ткани пероксида водорода;  
 б) прочность

Анализ данных рис. 1 позволяет заключить, что применение всех выбранных кислотных агентов при концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 40 г/л и FeSO<sub>4</sub> 0,5 г/л позволяет достигнуть крайне низкой степени белизны – не более 70%. При этом степень белизны на 10–13% меньше, чем полученная при низкотемпературном пероксидном белинии в течение 3-х суток в щелочной среде с использованием органических или неорганических стабилизаторов. При использовании уксусной, лимонной и щавелевой кислот процесс белиния протекает наиболее медленно, так как даже по истечению 7 суток, на ткани остается 19–28% пероксида водорода. Однако применение уксусной кислоты и анолита в качестве кислотного агента (варианты 2 и 6) позволяет достичь максимальной белизны после 7 суток – 70%. Применение серной кислоты приводит к белизне хлопчатобумажной ткани 56%. Прочность ткани после отбеливания снижается на 10–18%.

Из всех исследуемых кислотных агентов было отдано предпочтение серной кислоте, поскольку она является наиболее дешевым и доступным продуктом, не имеет запаха и при низких концентрациях не вызывает коррозию оборудования.

На следующем этапе работы было исследована кинетика процесса белиния при различных значениях pH белящего раствора. Результаты исследования представлены на рис. 2.

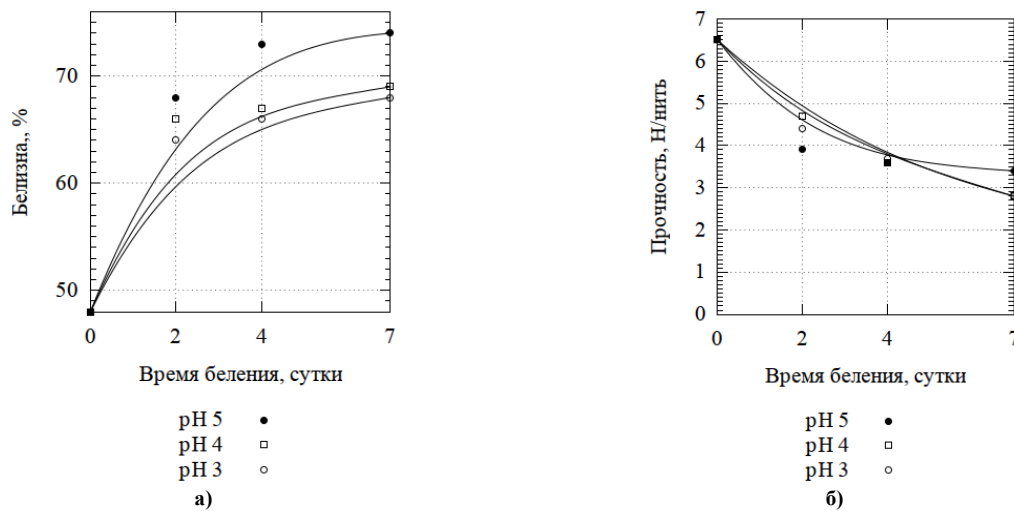


Рис. 2. Влияние pH белящего раствора и времени белиения на показатели качества отбеленной ткани: а) белизна; б) прочность

Анализ данных рис. 2, свидетельствует о том, что с увеличением концентрации кислотного агента в отбеливающем растворе белизна и прочность снижаются. Падение прочности в некоторых вариантах составило более 50%.

Важным компонентом отбеливающего раствора на основе реактива Фентона является катализатор. Поэтому следующим этапом работы было исследование влияния концентрации катализатора на степень белизны и физико-механические характеристики отбеленной ткани. Поскольку процесс отбеливания в кислой среде протекает медленнее, чем в щелочной, время вылеживания ткани составляло 7 суток. В лабораторных условиях вылеживание пропитанных образцов осуществляется в термостате, что позволяет поддерживать заданную температуру. Однако в условиях производства процесс осуществляется в неотопляемых помещениях, температура в которых зависит от температуры окружающей среды. Поэтому было исследовано влияние температуры на степень белизны и физико-механические характеристики отбеленной ткани. Ткань обрабатывали белящим раствором следующего состава (г/л):  $H_2O_2 - 40$  г/л,  $H_2SO_4 - 2$  г/л, ПАВ – 0,1 г/л,  $FeSO_4 - 0,1-1$ . Результаты исследования представлены на рис. 3.

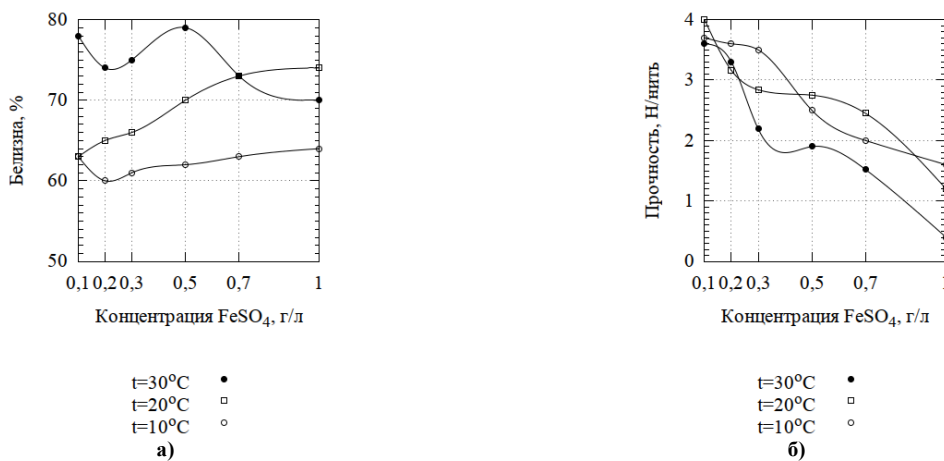


Рис. 3. Влияние концентрации  $FeSO_4$  и температуры вылеживания на показатели качества отбеленной ткани: а) белизна; б) прочность

Анализ результатов, представленных на рис. 3, показал, что повышение концентрация катализатора при температуре 10 и 20°C ведет к пропорциональному повышению белизны и падению прочности. При температуре 30°C зависимость белизны имеет экстремальный характер, а прочность падает с повышением концентрации катализатора. Наибольший показатель белизны 79% достигается при концентрации  $FeSO_4$  0,5 г/л и температуре белиения 30°C, однако при этом прочность отбеленной ткани снижается практически вдвое.

Незначительные потери прочности ткани наблюдаются при концентрациях катализатора 0,1-0,3 г/л во всем исследуемом интервале температур, однако при этих концентрациях не удается достигнуть высоких показателей белизны.

Таким образом, установлено, что при фиксированном содержании пероксида водорода в белящем составе 40 г/л, концентрация катализатора незначительно влияет на белизну отбеленной ткани, лучший показатель белизны составил 79% при неприемлемой потере прочности.

На следующем этапе работы было исследовано влияния концентрации пероксида водорода при

минимальной и максимальной концентрации катализатора. Хлопчатобумажная ткань была пропитана следующим составом (г/л):  $H_2O_2$  – 30-50,  $H_2SO_4$  – 2, ПАВ – 0,1,  $FeSO_4$  с концентрацией 0,5 и 0,1 г/л. Время беления составляло 7 суток при температуре 30°C. Данные исследования представлены на рис. 4.

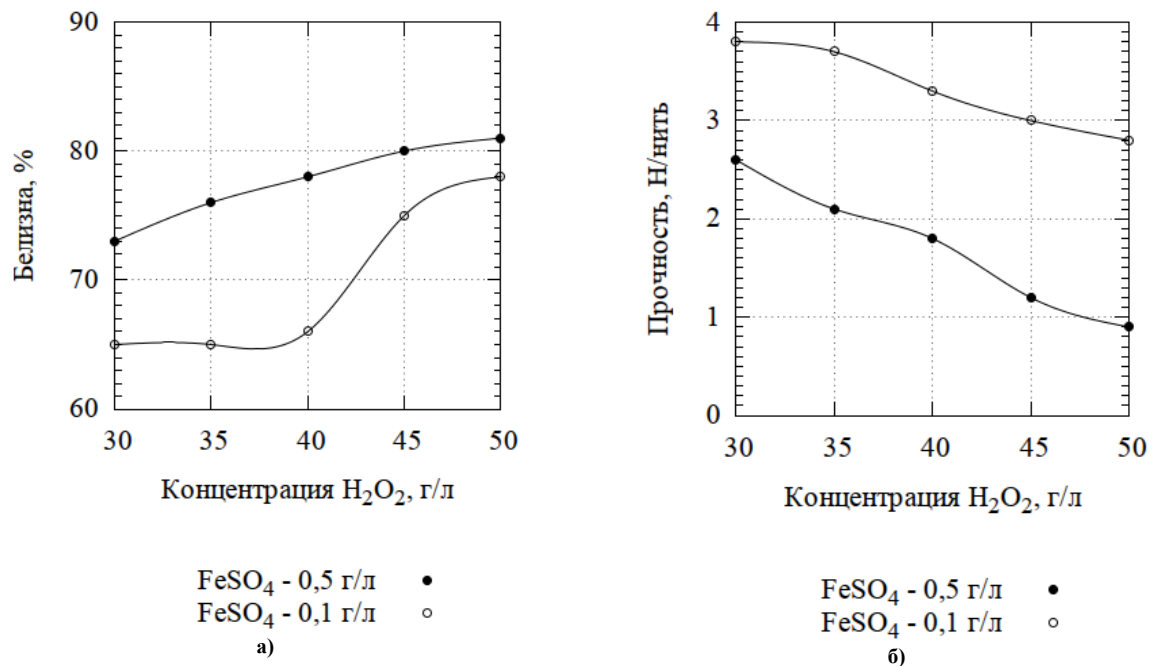


Рис. 4. Влияние концентрации  $H_2O_2$  и  $FeSO_4$  на показатели качества отбеленной ткани: а) белизна; б) прочность

Анализ данных рис. 4 свидетельствует о том, что при концентрации катализатора 0,5 г/л увеличение концентрации пероксида водорода в отбельном растворе способствует пропорциональному увеличению белизны ткани, однако при этом так же линейно снижается прочность волокна. Несмотря на полученную высокую белизну ткани 81% при концентрации  $H_2O_2$  50 г/л и  $FeSO_4$  0,5 г/л прочность отбеленной ткани снижается в несколько раз, что является неприемлемым результатом. При минимальной концентрации катализатора не достигается, высокая белизна (максимум 78%), однако при этом прочность ткани сохраняется лучше.

### Выводы

1. Изучение влияния кислотного агента на качество подготовки и скорость разложения пероксида водорода позволило установить что применение выбранных кислотных агентов при концентрации  $H_2O_2$  40 г/л и  $FeSO_4$  0,5 г/л позволяет достичь очень низкой степени белизны (не более 69%) за 5–7 суток, что на 10–13%, чем можно получить при низкотемпературном отбеливании в течение 3 суток в щелочной среде; при этом прочность ткани после отбеливания снижается на 12–18%.

2. Изучено влияния pH отбеливающего состава на качество подготовки и физико-механические свойства ткани и определено, что с увеличением концентрации кислотного агента в белящем растворе белизна и прочность ткани снижаются. Падение механической прочности в некоторых вариантах составляет более 50%, а белизна при этом составляет 68–74%.

3. Исследовано влияние температуры вылеживания и концентрации катализатора на качество подготовки. Установлено, что температура вылеживания оказывает значительное влияние как на белизну ткани, так и на физико-механические характеристики. Так при концентрации  $FeSO_4$  0,4 г/л и  $t=30^\circ C$  была достигнута белизна 79%, при той же концентрации катализатора, но при температуре  $10^\circ C$  степень белизны составила всего 60%, однако при этом прочность ткани у варианта, отбеленного при  $30^\circ C$  почти в 2 раза ниже. Увеличение концентрации катализатора с 0,1 до 0,5 дает незначительный прирост степени белизны при одновременном значительном (до 50%) снижении прочности отбеленной ткани. С увеличением температура вылеживания, при наличии в белящем растворе катализатора, прочность ткани снижается.

4. Установлено, что увеличение концентрации катализатора и пероксида водорода в отбельном растворе способствует пропорциональному увеличению белизны ткани, однако при этом так же линейно снижается прочность волокна. Высокий показатель белизны ткани (81%) достигается при концентрации  $H_2O_2$  50 г/л и  $FeSO_4$  0,5 г/л, однако при этом прочность отбеленной ткани снижается в несколько раз, что является неприемлемым результатом. При минимальной концентрации катализатора не достигается, высокая белизна, однако при этом прочность ткани сохраняется лучше.

**Литература**

1. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов : учебник для ВУЗов : в 3 т. Т. 1 / Кричевский Г.Е. – М., 2001. – 540 с.
2. Сафонов В.В. Облагораживание текстильных материалов / Сафонов В.В. – М. : Легпромбытгиздат, 1991. – 288 с.
3. Андросов В.Ф. Технология отделки хлопчатобумажных тканей / Андросов В.Ф. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 424 с.
4. Бернад В. Практика беления и крашения текстильных материалов (механическая и химическая технология) / Бернад В. ; [пер. с нем. Е.С. Шатровой, Н.Г. Прытковой ; под ред. Л.И. Беленького]. – М. : Легкая индустрия, 1971. – 472 с.
5. Кричевский Г.Е. Теория и практика подготовки текстильных материалов / Г.Е. Кричевский, В.А. Никитков. – М. : Легпромбытгиздат, 1989. – 208 с.
6. Химия и технология перекиси водорода / [под ред. Серышева Г.А.]. – М. : Химия, 1984. – 200 с.
7. Перекись водорода и перекисные соединения / [под ред. Позина М.Е.]. – М. : Госхимиздат, 1951. – 468 с.
8. Topalovic T. Catalytic Bleaching of Cotton: Molecular and Macroscopic Aspects: dissertation to obtain the doctor's degree. University of Twente, the Netherlands, 2007. 195 p.
9. Sadrzadeh S.M.H., Graf E., Panter S.S., Hallaway P.E., Eaton J.W. Hemoglobin. A biologic Fenton reagent. *J. Biol. Chem.* 1984. Vol. 259, № 23. P. 14354–14356.
10. Девис Д. Свободные радикалы в органическом синтезе / Д. Девис, М. Перрет ; [пер. с англ. Н.С. Зефирова]. – М. : Мир, 1980. – 207 с.

**References**

1. Krichevskij G.E. Himicheskaya tehnologiya tekstil'ny'x materialov. Moscow, 2001, vol. 1, 540 p.
2. Safonov V.V. Oblagorazhivanie tekstil'ny'h materialov. Moscow, Legpromby'tizdat, 1991, 288 p.
3. Androsoy V.F. Tehnologiya otdelki hlochatobumazhny'h tkanej. Moskov, Legkaya i pyshhevaya promy'shlnennost', 1983, 424 p.
4. Bernard V. Praktika beleniya i krasheniya tekstil'ny'h materyalov (mehanicheskaya i himicheskaya tehnologiya). Moscow, Legkaia industriya, 1971, 472 p.
5. Krichevskij G.E., Nikitkov V.A. Teoriya i praktika podgotovki tekstil'ny'h materialov. Moscow, Legpromby'tizdat, 1989, 208 p.
6. Sery'shev G.A. Himiya i tehnologiya perekisi vodoroda. Moscow, Hymija, 1984, 200 p.
7. Pozin M.E. Perekis' vodoroda i perekisny'e soedineniya. Moscow, Goshimizdat, 1951, 468 p.
8. Topalovic T. Catalytic Bleaching of Cotton: Molecular and Macroscopic Aspects: dissertation to obtain the doctor's degree. University of Twente, the Netherlands, 2007, 195 p.
9. Sadrzadeh S.M.H. Hemoglobin. A biologic Fenton reagent, *J. Biol. Chem.*, 1984, Vol. 259, №23, pp. 14354-14356.
10. Devys D., Perret M. Svobodny'e radikaly' v organicheskom sinteze. Moscow, Mir, 1980, 207 p.

Рецензія/Peer review : 8.2.2015 р. Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., професор Сарибекова Д.Г.



Г.В. МІЩЕНКО, Д.С. КАЧУК  
Херсонський національний технічний університет  
В.В. НАЗАРОВА  
Херсонська державна морська академія

## ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОФОБІЗАЦІЇ ТКАНИН З ПІГМЕНТОВАНИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ПЛІВКАМИ НА ПОВЕРХНІ

*Розглянуто особливості гідрофобізації тканин, зокрема камуфляжних, які попередньо були пофарбовані субстантивними барвниками і надруковані за пігментною технологією. Показано, що під час гідрофобізації таких тканин утворюється більш складний адсорбційний комплекс, в якому змінюються характер і міцність зв'язків між шарами полімерів. Розглянуто шляхи і запропоновано добавки, які збільшують міцність зв'язку на межі «полімер-гідрофобізатор – полімер-зв'язуюче» і забезпечують підвищення якості водовідштовхувального ефекту, сформованого кремнійорганічними олігомерами. Визначено вплив пігментованої плівки на поверхні тканин на процес адсорбції гідрофобізатору і добавки, які інтенсифікують цей процес.*

*Ключові слова: гідрофобізація, водовідштовхування, тканина, пігмент, адсорбція, плівка, зв'язуюче, якість.*

H.V. MISCHENKO, D.S. KACHUK  
Kherson National Technical University  
V.V. NAZAROVA  
Kherson State Maritime Academy

## FEATURES OF HYDROPHOBIZATION OF THE FABRICS WITH PIGMENTED POLYMERIC FILMS ON THE SURFACE

*Abstract – The features of hydrophobization of fabrics, in particular camouflage, previously painted by substantive dyes and printed by the pigment technology have been considered. It was shown that in hydrophobization of such fabrics more sophisticated adsorption complex is formed, where the nature and strength of links between layers of polymers are changed. An analysis was made of the ways and additions that increase the strength of the bond on the verge of "polymer-water repellent – polymer-binder" and provide the improving of quality of water repellent effect formed by silicon oligomers were proposed. The influence of pigmented film on the surface of fabrics on the process of adsorption of water repellent and additives that intensify this process were determined.*

*Keywords: hydrophobization, water repellence, fabric, pigment, adsorption, film, binder, quality.*

### Постановка проблеми

Гідрофобізація текстильних матеріалів, до якої відносять водовідштовхувальне оброблення тканин, є найбільш поширеною серед спеціальних видів оброблення останніх. Гідрофобізації піддають текстильні матеріали з різним волокнистим складом та різного призначення. Серед цих матеріалів значне місце займають тканини, що були надруковані за пігментною технологією, зокрема це камуфляжні тканини. Але надання водовідштовхувальних властивостей цим тканинам на заключній стадії опорядження за найбільш поширеною технологією гідрофобізації, побудованою на застосуванні кремнійорганічних сполук (КОС), не забезпечує одержання якісного ефекту.

Оцінка показника водовідштовхування на камуфляжних тканинах, опоряджених за розробленою у роботі [1] технологією водовідштовхувального оброблення, показала, що на одній і тій же тканині мають місце різні показники водовідштовхування: на пофарбованих ділянках – до 100 у.о., а на ділянках, надрукованих пігментами, лише 50–60 у.о. Тобто 50 відсотків поверхні тканини змочуватиметься, що вимагає розробки окремої технології водовідштовхувального оброблення для таких тканин.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Спеціальні властивості тканин, в тому числі і водовідштовхувальні, яких тканини набувають в процесі заключного оброблення, у теперішній час є найбільш вимоговими [2].

Водовідштовхувальні властивості текстильним матеріалам надаються шляхом нанесення на них спеціальних гідрофобізуючих препаратів, серед яких найбільше практичне значення мають два типи сполук: кремнійорганічні і флуорорганічні. Незважаючи на те, що дослідження кремнійорганічних сполук як гідрофобізаторів триває більше п'ятдесяти років [3–5], можливості цих сполук не вичерпано і вони не втратили свого значення дотепер, про що свідчить значний обсяг літератури, в якій КОС є предметом дослідження [6–8].

Основну увагу дослідники приділяють розробці ресурсоощадної технології, зниженню матеріало- та енерговитрат, підвищенню якості ефектів гідрофобізації. В результаті цих робіт розроблено ресурсозберігаючу технологію [1], що забезпечує стовідсоткове водовідштовхування з поверхні тканин, тобто ефект вищий за той, що вимагає держстандарт України, і знаходиться на рівні показників, що забезпечуються флуорорганічними сполуками, вартість яких значно вища за вартість кремнійорганічних сполук.

Однак, як відмічено вище, технологія не працює на тканинах, які попередньо оброблялися за пігментною технологією і містять на поверхні пігментовану полімерну плівку.

### Мета дослідження

Метою даної роботи є одержання високоякісного ефекту водовідштовхування на камуфляжних тканинах шляхом дослідження особливостей гідрофобізації тканин, надрукованих за пігментною технологією,

і пошуку шляхів підвищення якості гідрофобізації таких тканин кремнійорганічними сполуками.

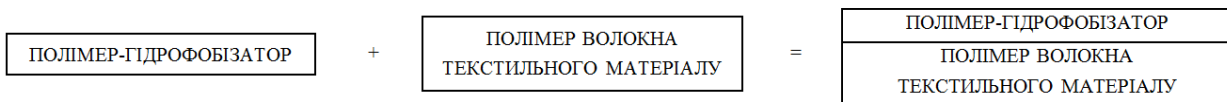
**Основний матеріал дослідження**

Забарвлені за пігментною технологією тканини, в тому числі камуфляжні, перед заключним обробленням зазвичай піддаються фарбуванню субстантивними барвниками і друкуванню пігментами, які закріплюються на поверхні тканини плівками полімерних зв'язуючих, що поряд з пігментом входять до друкувального складу, який наносять на поверхню тканини до її гідрофобізації. Наявність плівки зв'язуючого на поверхні тканини змінює її поверхневі характеристики, що впливає на процес адсорбції полімеру-гідрофобізатору поверхнею тканини в процесі її гідрофобізації і характер зв'язків у адсорбційному комплексі, що утворюється в результаті адсорбції полімеру-гідрофобізатору субстратом.

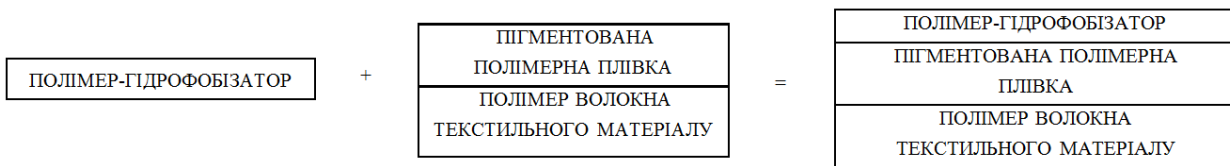
Ці фактори обумовлюють визначення тих задач, що треба вирішувати для досягнення поставленої в роботі мети. Отже, це наступні задачі:

- вивчення впливу на адсорбцію полімеру-гідрофобізатору наявності на волокні плівки зв'язуючого та забезпечення у разі необхідності (при зниженні адсорбції полімеру) інтенсифікації процесу адсорбції;
- визначення поверхневих характеристик тканини після її друкування пігментами і утворення адсорбційних комплексів з полімером-гідрофобізатором;
- забезпечення стійкості адсорбційних комплексів, що утворюються в процесі гідрофобізації тканин.

На рис. 2 процес гідрофобізації камуфляжних тканин, що забарвлювалися за пігментною технологією, представлено як утворення більш складного адсорбційного комплексу у порівнянні з таким, що утворюється в процесі гідрофобізації тканин, забарвлених субстантивними барвниками, без участі зв'язуючих (рис. 1).

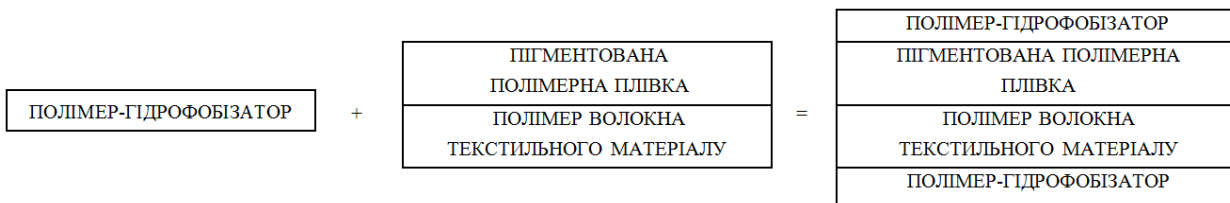


**Рис. 1.** Адсорбційний комплекс, що утворюється при гідрофобізації тканини, забарвленої субстантивними барвниками



**Рис. 2.** Адсорбційний комплекс, що утворюється при гідрофобізації тканини, забарвленої пігментами

Якщо врахувати особливості пігментного друку, а саме те, що барвник з плівкою зв'язуючого при якісному друці знаходиться лише на лицевій поверхні тканини, схема, подана на рис. 2, буде мати наступний вигляд (рис. 3):



**Рис. 3.** Адсорбційний комплекс, що утворюється при гідрофобізації тканини, забарвленої пігментами, з урахуванням особливостей пігментного друку

Розгляд процесу формування водовідштовхувального ефекту на тканині з пігментованою плівкою на поверхні як утворення адсорбційного комплексу дає можливість вирішувати проблему як його стійкості, так і одержаного ефекту з позицій колоїдної хімії полімерів, застосовуючи для цього характеристики поверхневих властивостей полімерів, що утворюють комплекс, в тому числі вільну енергію на поверхні розділу двох конденсованих фаз.

У даній роботі для одержання і вивчення адсорбційних комплексів у якості полімеру гідрофобізатору використовували п'ятидесятитидсоткову водну емульсію олігометилгідрисилоксану.

Підготовану плащову тканину арт. 2701, до складу якої входить 53 % бавовни і 47 % поліефірного волокна, фарбували активними і дисперсними барвниками за технологією, прийнятою на ПАТ «Черкаський шовковий комбінат», і просочували вказаною емульсією, після чого тканину висушували.

Для одержання комплексу, представленого на рис. 2, пофарбовану тканину друкували за типовою технологією пігментами, для чого використовували у якості зв'язуючого водні дисперсії акрилових кополімерів, а саме: стиrolакриловий кополімер з підвищеним вмістом карбоксильних груп і кополімер бутилакрилату і стиrolу, що містив фрагменти метилоакриламіду (виробництво «Полімер», м. Херсон). Після друкування тканину просочували КОС і сушили.

У наведених на рис. 1, 2 комплексах об'єднані полімери, плівки яких значно відрізняються одна від одної за хімічним складом і поверхневими енергіями.

Для розрахунку вільної енергії на поверхні розділу плівок здійснювали оцінку поверхневих енергій вільних плівок  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ , а також їх дисперсійної складової та складової, обумовленої утворенням водневих зв'язків, за даними вимірювань на поверхні плівок крайових кутів змочування двох рідин з відомими значеннями  $\gamma$  та її складових з використанням методу Ребіндера, після чого визначали міжфазний натяг  $\gamma_{1,2}$  розрахунковим методом [9]. Для цієї цілі використовували узагальнене рівняння Оуенса і Вендта, запропоноване для усіх систем, в тому числі для двох твердих поверхонь:

$$\gamma_{1,2} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2(\gamma_1^d \gamma_2^d)^{1/2} - 2(\gamma_1^h \gamma_2^h)^{1/2} \quad (1)$$

або

$$\gamma_{1,2} = [(\gamma_1^d)^{1/2} - (\gamma_2^d)^{1/2}]^2 + [(\gamma_1^h)^{1/2} - (\gamma_2^h)^{1/2}]^2 \quad (2)$$

де  $\gamma_{1,2}$  – міжфазний натяг на межі розділу між речовинами 1 і 2;

$\gamma_1^d, \gamma_2^d$  – дисперсійна складова вільної поверхневої енергії для речовин 1 і 2 відповідно;

$\gamma_1^h, \gamma_2^h$  – складова вільної поверхневої енергії, обумовлена утворенням водневих зв'язків, для речовин 1 і 2 відповідно.

В цих рівняннях враховано, що вільна енергія  $\gamma$  плівок складається з різних сил: водневих –  $\gamma^h$  і дисперсійних  $\gamma^d$ .

Визначення поверхневих енергій показало, що кремнійорганічний олігомер формує плівку з поверхневою енергією 20–22 мДж/м<sup>2</sup>, а плівки з акрилових кополімерів мають поверхневу енергію 60–66 мДж/м<sup>2</sup>.

Критична поверхнева енергія бавовняного волокна знаходиться в залежності від ступеня його підготовки до опорядження і коливається в межах 22 мДж/м<sup>2</sup> для непідготовленого волокна і 50 мДж/м<sup>2</sup> для якісно підготовленого.

Розрахунок  $\gamma_{1,2}$  для комплексів, поданих на рис. 1 і 2, показав, що система, сформована полімерами лгідрофобізатору і зв'язуючого, характеризується досить високим міжфазним натягом, що знаходиться у межах 25–30 мДж/м<sup>2</sup>, в той час як для системи «кремнійорганічний полімер – полімер волокна» даний показник становить 15–18 мДж/м<sup>2</sup>. Одержані дані свідчать, що комплекси, зображені на рис. 1 і 2, будуть значно відрізнятися за стійкістю, а отже, значно будуть відрізнятися і показники стійкості водовідштовхувального ефекту, сформованого цими комплексами.

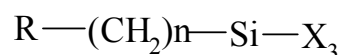
Для забезпечення необхідної міцності і стійкості подібних утворень треба обирати полімери з відповідними характеристиками. Оскільки типи полімерів визначено технологіями опорядження і змінювати їх можливості немає, для забезпечення стійкості комплексу «полімер гідрофобізатору – полімер зв'язуючого – полімер волокна» можна використати два інші шляхи:

- застосування солей-комплексоутворювачів, здатних зв'язати шари різних полімерних плівок між собою;
- використання промоторів адгезії [10, 11].

Отже, задача на наступному етапі роботи полягала у пошуку відповідних промоторів адгезії, які будуть ефективно «працювати» у конкретному комплексі, а саме – утвореному кремнійорганічним олігомером і акриловим кополімером.

Розглянувши можливі для підсилення адгезії сполуки і враховуючи екологічний і технологічний аспекти їх застосування на виробництві, ми зупинили свій вибір на силанах.

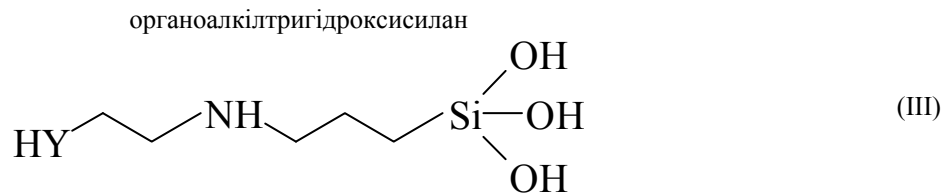
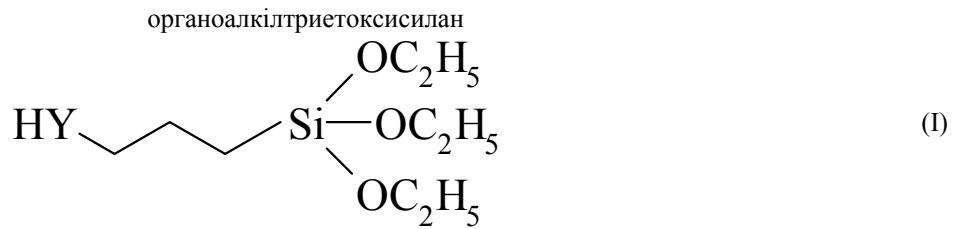
Загальна формула силану, що є промотором адгезії, демонструє наявність функціональних груп двох класів сполук:



де X – група, що підлягає гідролізу – зазвичай алкокси-, ацилоксигрупа, галогеновмісна або аміногрупа; R – органічний радикал.

Триалкоксилани гідролізуються з формуванням силаноловмісних аналогів. Далі відбувається конденсація з утворенням олігомерів. Олігомери взаємодіють з функціональними групами речовин з наступним формуванням ковалентних зв'язків. Реакції відбуваються одночасно після початкової стадії – гідролізу. Група R залишається доступною для ковалентного зв'язування або фізичної взаємодії з іншими фазами [12].

У роботі у якості таких промоторів адгезії було обрано дві сполуки:



Нижче, в табл. 1 показано, як впливають обрані силани на якість водовідштовхувального ефекту. До аפרету додавали аміни, оскільки вони є необхідними складовими при застосуванні даних силанів [13].

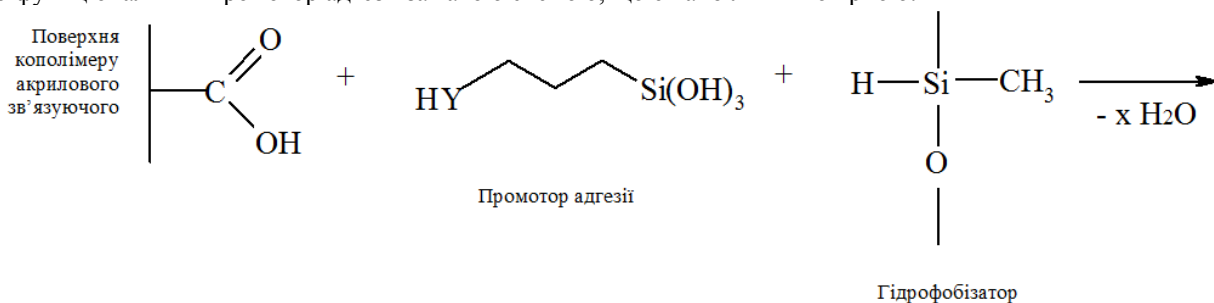
Таблиця 1

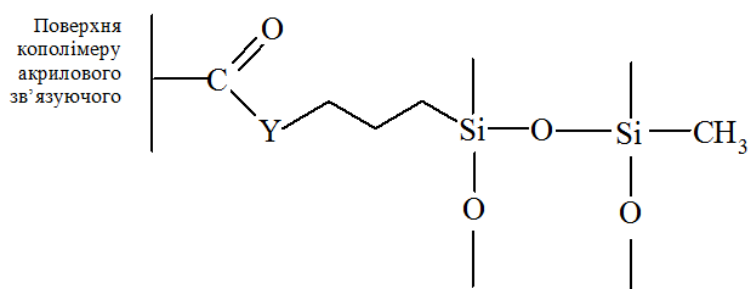
**Вплив добавок на ефект гідрофобного оброблення олігометилгідридсилоксаном надруксованої пігментами бавовняної тканини**

Компоненти аפרету	Концентрація компонентів, г/л	Водовідштовхування, у.о.		
		80 °C	120 °C	сушка 80 °C, т/о – 150 °C
Гідрофобізатор Силан I Первинний амін	30 5 15	0–50	50	70
Гідрофобізатор Силан I Вторинний амін	30 5 15	55	70	85
Гідрофобізатор Силан I Третинний амін	30 5 15	60	60	75
Гідрофобізатор Силан II Первинний амін	30 5 15	0	0	50
Гідрофобізатор Силан II Вторинний амін	30 5 15	0–50	0–50	55
Гідрофобізатор Силан II Третинний амін	30 5 15	0–50	0–50	55

У присутності силану I одержано водовідштовхувальний ефект, що знаходиться у межах держстандарту.

Взаємодія макромолекул полімеру-гідрофобізатору з акриловим полімером, що має вільні карбоксильні групи, і розташованим на поверхні субстрату, що опоряджується, здійснюється через біфункціональний промотор адгезії за такою схемою, що є найбільш ймовірною:





Загальний комплекс, що утворюється на поверхні тканини, і відповідає наведеному на рис. 2, може бути представлений такою ймовірною схемою:

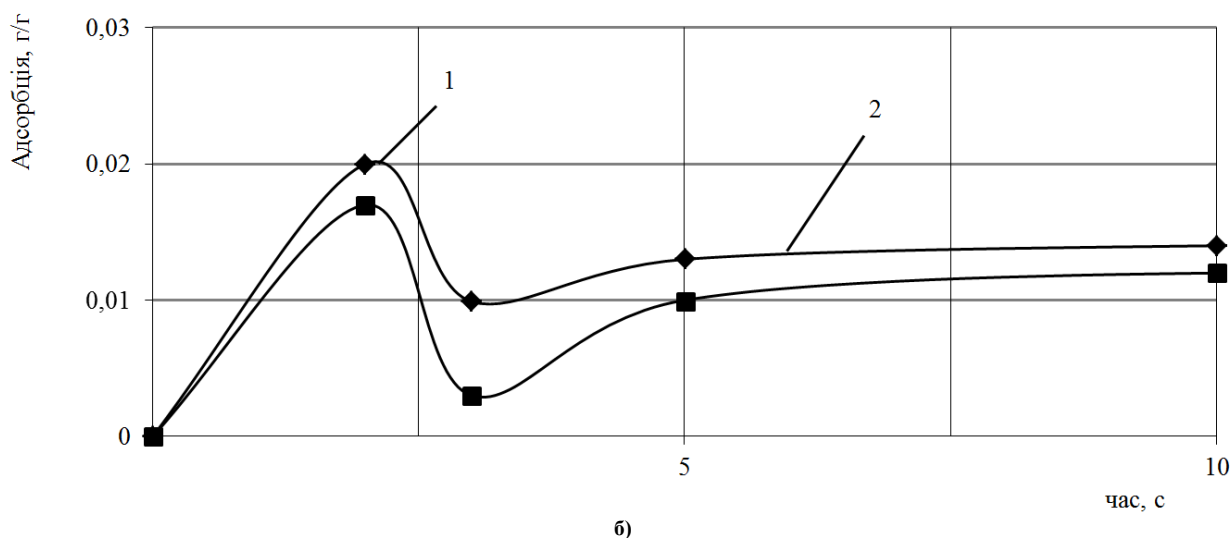
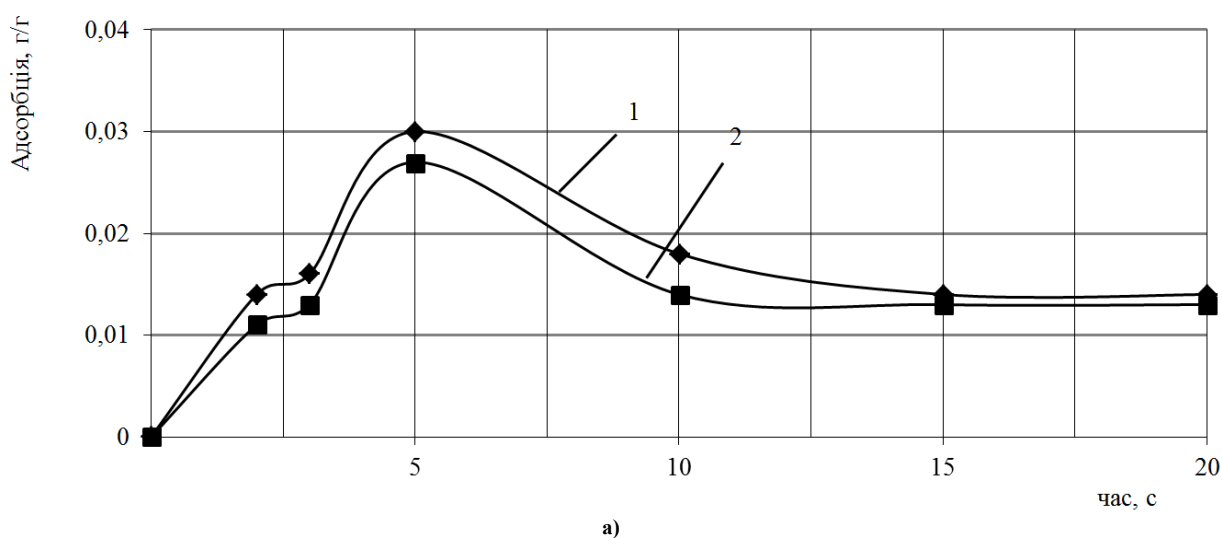
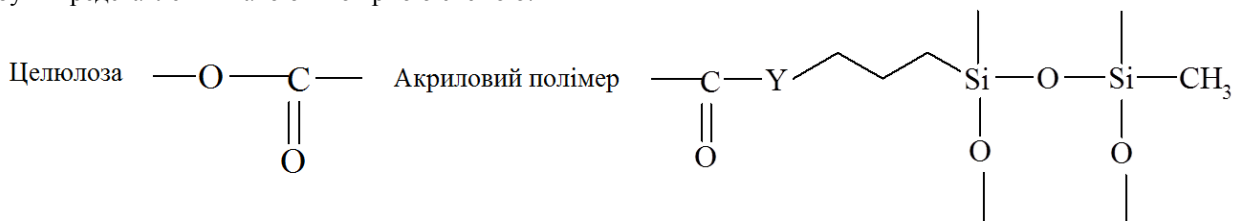


Рис 4. Кінетичні криві адсорбції кремнійорганічного гідрофобізатору (концентрація 30 г/л) тканиною:  
1 – бавовняною (арт. 5107); 2 – бавовняно-поліефірною (арт. 3112)  
а) відбіленою; б) надрукованою пігментним складом на основі акрилового зв'язуючого

З наведеної схеми видно, що на поверхні опорядженої тканини збільшується кількість кремнійвмісних груп, що збільшує водовідштовхувальний ефект.

Можливість утворення наведеної вище схеми і збільшення на поверхні тканини угруповань з атомом Силіцію підтверджена методом інфрачервоної спектроскопії. Були зняті ІЧ-спектри зразків бавовняно-поліефірної тканини, надрукованої пігментами і просоченої кремнійорганічним олігомером в

присутності добавки біфункціонального кремнієвмісного промотору адгезії та без цієї добавки. На спектрах спостерігався ріст інтенсивності смуги при  $1017\text{ см}^{-1}$ , яка відноситься до валентних коливань угруповання – Si – O – Si –, що може свідчити про утворення зв'язків між біфункціональним промотором адгезії і кремнійорганічним полімером гідрофобізатору.

Для одержання вимогового водовідштовхувального ефекту треба забезпечити необхідну кількість полімеру гідрофобізатору на поверхні тканини. Цей показник забезпечується на стадії просочування тканини розчином, що включає гідрофобізуючий полімер, на якій відбувається адсорбція полімеру поверхнею тканини.

На рис. 4 показано, як знижується адсорбція полімеру гідрофобізатору тканиною, на поверхні якої вже знаходиться полімерна плівка, сформована полімером зв'язуючого в процесі друкування тканини пігментами.

Дані одержували гравіметричним способом, для чого визначали адсорбцію за різні відрізки часу зразками тканини з полімером на поверхні (рис. 4.а) і без нього (рис. 4.б).

З експериментальних даних, наведених на рис. 4, видно, що кількість полімеру-гідрофобізатору за час просочення (2–5 с) знижується з 30 г/кг до 20 г/кг. Отже, процес адсорбції потребує інтенсифікації, для чого можуть слугувати різні добавки просочувальної ванни. Нами встановлено, що інтенсифікаторами адсорбції КОС є солі d-металів, аміни і безпосередньо промотор адгезії.

Нижче, на рис. 5 показано, як збільшується адсорбція гідрофобізатору бавовняною тканиною, надрукованою пігментами, у присутності амінів.

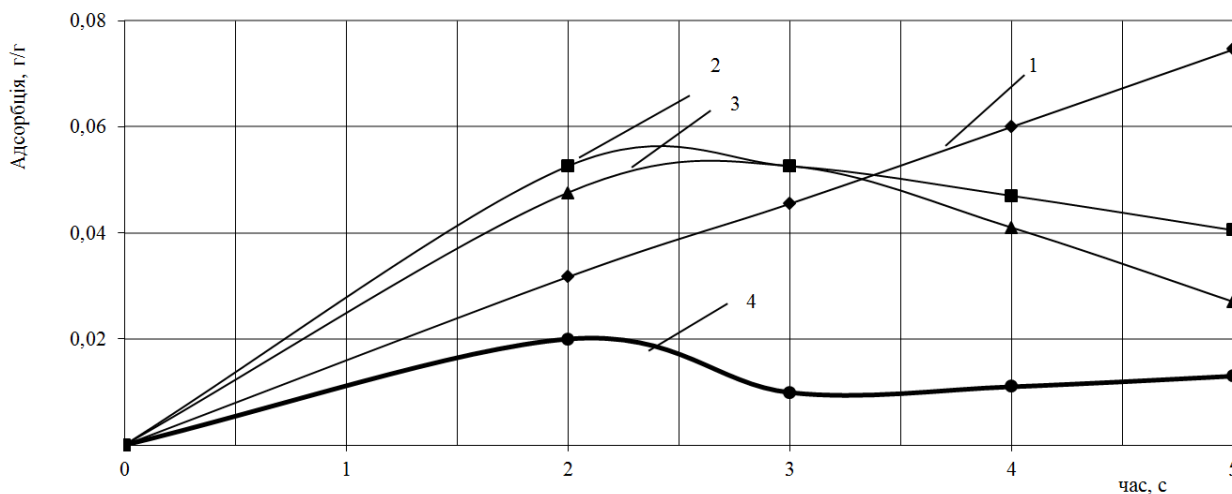


Рис. 5. Кінетичні криві адсорбції гідрофобізатору бавовняною тканиною, надрукованою пігментним складом, в присутності амінів: 1 – первинного аміну; 2 – вторинного аміну; 3 – третинного аміну; 4 – без аміну

Час просочення зразків тканини при побудові кінетичних кривих обмежено часом її перебування у плюсовці, тому у якості добавок, що підсилюють адсорбцію, можуть бути рекомендовані вторинні і третинні аміни.

Добавки амінів збільшують адсорбцію полімеру гідрофобізатору майже у 2 рази у порівнянні з тканиною, що не містить плівки на поверхні, і у 3 рази – з тією, що містить плівку зв'язуючого. Аналогічний характер мають кінетичні криві сорбції гідрофобізатору у присутності солей і промотору адгезії.

Отже, адсорбція полімеру-гідрофобізатору тканинами – процес, який легко регулюється нескладними технологічними прийомами, в тому числі на тих тканинах, що містять на поверхні полімерну плівку.

## Висновки

Показано причини зниження показників водовідштовхувальних властивостей при формуванні гідрофобного ефекту на тканинах, забарвлених за пігментною технологією, для чого процес гідрофобізації розглянуто як ускладнення адсорбційного комплексу, в якому змінюється характер і міцність зв'язків між шарами полімерів.

Показано ефективність застосування біфункціональних силанів для підвищення якості водовідштовхувального оброблення в процесі гідрофобізації кремнійорганічними сполуками камуфляжних тканин, що обумовлюється їх спорідненістю як до полімеру гідрофобізатору, так і до акрилового зв'язуючого, який утримує пігмент на волокні. Ефект водовідштовхування в присутності біфункціональних силанів може бути збільшено з 50 у.о. до 80–90 у.о.

Вивчено процес адсорбції полімеру-гідрофобізатору тканинами, на поверхні яких знаходиться пігментована акрилова плівка. Показано, що присутність останньої на волокні зменшує адсорбцію полімеру гідрофобізатору в 1,5 рази, що також є причиною зниження ефекту гідрофобізації на цих тканинах.

Показано, що процес адсорбції полімеру-гідрофобізатору тканиною з полімерною пігментованою

плівкою на поверхні легко піддається інтенсифікації, в результаті якої кількість полімеру на волокні може бути збільшена до вимогових значень нескладними технологічними прийомами.

### Література

1. Назарова В.В. Розробка матеріало- та енергозберігаючої технології гідрофобної обробки тканин кремнійорганічними олігомерами : дис. ... кандидата технічних наук : 05.19.03 / Назарова Вікторія Вікторівна. – Херсон, 2009. – 219 с.
2. Глубіш П.А. Хімічна технологія текстильних матеріалів (Завершальне оброблення) : навч. посіб. / Глубіш П.А. – К. : Арістей, 2006. – 304 с.
3. Волкова Л.М. Исследование новых кремнийорганических препаратов для гидрофобизации хлопчатобумажных тканей / Л.М. Волкова // Применение силиконов в текстильной и легкой промышленности / Л.М. Волкова. – М. : ЦНИИТЭИЛегпрома, 1970. – С. 74–80.
4. Орлов Н.Ф. Кремнийорганические соединения в текстильной и легкой промышленности / Орлов Н.Ф., Андросова М.В., Введенский Н.В. – М. : Легкая индустрия, 1966. – 240 с.
5. Семак Б.Д. Износостойкие ткани с отделкой силиконами / Семак Б.Д. – М. : Легкая индустрия, 1977. – 152 с.
6. Міщенко Г.В. Кремнієорганічні сполуки у сучасних технологіях гідрофобного оброблення тканин / Г.В. Міщенко, В.В. Назарова. – Херсон : Видавництво «Олді-плюс», 2011. – 189 с.
7. Качук Д.С. Гидрофобная отделка кремнийорганическими соединениями текстильных материалов, напечатанных пигментами / Д.С. Качук, Л.А. Нестерова, Е.А. Венгер // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014. – № 5. – С. 123–129.
8. Измайлов Б.А. Гидрофобная отделка текстильных материалов хлопчатобумажных и полшерстяных волокон высшими олиго(алкилоксиметил)силоксанами / Б.А. Измайлов, А.В. Неделькин, О.В. Ямбулатова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 43–46.
9. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Д.В. Ван Кревелен ; [пер. с англ. Ф.Ф. Ходжеванова] ; под ред. А.Я. Малкина. – М. : Издательство «Химия», 1976. – С. 101–103.
10. Verkholtantsev V.V. Adhesion promoters. *European Coatings Journal*. 1999. № 11. pp. 52–60.
11. M. Arif Butt, Arshad Chughtai, Javaid Ahmad, Rafiq Ahmad, Usman Majeed, I.H. Khan Theory of Adhesion and its Practical Implications. A Critical Review. *Journal of Faculty of Engineering and Technology*. 2007–2008. pp. 21–45.
12. Barry Arkles Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries. Morrisville, PA : Gelest, Inc., 2006. 60 p.
13. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений / Фрейдин А.С. – М. : Химия, 1981. – 272 с.

### References

1. Nazarova V.V. Rozrobka materialo- ta enerhozberihaiuchoi tekhnolohii hidrofobnoi obrobky tkanyn kremniiorhanichnymy olihomeramy : dys... kandydata tekhnichnykh nauk : 05.19.03. Kherson, 2009, 219 p.
2. Hlubish P.A. Khimichna tekhnolohiia tekstylnykh materialiv (Zavershalne obroblennia) : navch. posib. Kyiv, Aristei, 2006, 304 p.
3. Volkova L.M. Issledovanye novy'x kremnyjorganicheskyykh preparatov dlya gidrofobizatsii xlopchatobumazhny'x tkaney. *Primenenie silikonov v tekstil'noj i legkoj promy'shlnosti*. Moscow, CzNIITE'ILegproma, 1970, pp. 74-80.
4. Orlov N.F., Androsova M.V., Vvedenskiy N.B. Kremnijorganicheskie soedineniya v tekstil'noj i legkoj promy'shlnosti. Moscow, Lyogkaya industriya, 1966, 240 p.
5. Semak B.D. Iznosostojkie tkani s otdelkoj silikonami. Moscow, Lyogkaya industriya, 1977, 152 p.
6. Mishchenko H.V., Nazarova V.V. Kremniieorhanichni spoluky u suchasnykh tekhnolohiiakh hidrofobnoho obroblennia tkanyn. Kherson, vydavnytstvo «Oldi-plius», 2011, 189 p.
7. Kachuk D.S., Nesterova L.A., Venger E.A. Gidrofobnaya otdelka kremnijorganicheskimi soedineniyami tekstil'ny'x materialov, napechatanny'x pigmentami, *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promy'shlnosti*, 2014, No. 5, pp. 123-129.
8. Izmajlov B.A., Nedel'kin A.V., Yambulatova O.V. Gidrofobnaya otdelka tekstil'ny'x materialov xlopchatobumazhny'x i polusherstyany'x volokon vy'sshimi oligo(alkiloksimetilen)siloksanami, *Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promy'shlnosti*, 2009, No. 2, pp. 43-46.
9. D.V. Van Krevelen Svojstva i ximicheskoe stroenie polimerov. Ed. by A.Ya. Malkina, Moscow, Izdatel'stvo «Ximiya», 1976, pp. 101-103.
10. Verkholtantsev V.V. Adhesion promoters, *European Coatings Journal*, 1999, No. 11, pp. 52-60.
11. M. Arif Butt, Arshad Chughtai, Javaid Ahmad, Rafiq Ahmad, Usman Majeed, I.H. Khan, Theory of Adhesion and its Practical Implications. A Critical Review, *Journal of Faculty of Engineering and Technology*, 2007 – 2008, pp. 21-45.
12. Barry Arkles, Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries. Morrisville, PA, Gelest, Inc., 2006, 60 p.
13. Frejdin A.S. Prochnost' i dolgovechnost' kleevyx soedinenij. Moscow, Ximiya, 1981, 272 p.

Рецензія/Peer review : 18.1.2015 р.

Надрукована/Printed : 26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Валько М.І.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО КОМПОЗИЦІЙНО-КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ВЗУТТЯ ДЛЯ ДІТЕЙ-ШКОЛЯРІВ

*В статті проведено аналіз композиційно-конструктивних елементів проектування взуття. Розроблено анкети для дітей-школярів та їх батьків для визначення пріоритетних показників. Встановлені естетичні та конструктивні показники, які, в першу чергу, впливають на вибір споживачів під час вибору взуття. Показана можливість та доцільність застосування означених показників в ході проектування взуття для дітей-школярів.*

*Ключові слова: проектування деталей верху взуття, естетичні показники, конструктивні показники, конструкція, якість взуття, художньо-композиційні елементи.*

O.V. SKIDAN

Kyiv National University of Technologies and Design  
T.A. NADOPTA, A.B. DOMBROVSKY  
Khmelnytsky National University

## IDENTIFY OF PRIORITY OF COMPOSITIONAL-DESIGN SOLUTION OF SHOES FOR SCHOLCHILDREN

**Abstract** – *The analysis of compositional and structural elements of shoes design for schoolchildren is given. It allows to improve the quality and the competitiveness of shoes for children. The questioning of children and their parents was offered as a method of determination of aesthetic and constructive parameters. The research results were processed with using software modules in which the error does not exceed 5%. The aesthetics and design parameters which primarily determine the choice of consumer buying shoes were researched. Research results that shoes for schoolchildren have to comply with aesthetic requirements which include material colour, novelty of composite solution and stylistic unity of elements. It is necessary to take into account the anatomical features and stop constructive parameters. The possibility and feasibility of the mentioned parameters using, when shoes for children are designing, is demonstrated.*

**Keywords:** *design details uppers, aesthetic performance, structural performance, design, quality shoes, artistic and compositional elements*

### Постановка проблеми

В сучасних умовах конкурентоспроможність взуттєвих виробів забезпечується високою якістю, доступною ціною та широким асортиментом, зокрема, це стосується взуттєвої продукції, котра призначена для дітей-школярів [1]. Забезпечення загальних критеріїв якості взуття для дітей-школярів можливо лише із залученням сучасних комплексних методів на всіх етапах проектування та виготовлення виробів. Розробляючи ескіз моделі необхідно враховувати весь спектр різноманітних вимог до взуття, однак найкращий результат досягається тоді, коли ідея підкріплена науковою та технічною базою, що дозволяє втілити творчу думку в реальний виріб. Взуття для дітей-школярів повинно максимально відповідати віковим особливостям і характеру діяльності дитини.

Стратегія розвитку взуттєвої галузі зорієнтована на ефективне використання інноваційних досягнень науки, зокрема, застосування систем автоматизованого проектування (САПР), котрі передбачають втілення математичних методів і технологій. Особливо при створенні САПР взуття для дітей-школярів необхідно враховувати конструктивні ознаки взуття та естетичні властивості виробів. Взуття для дітей-школярів є способом самовираження та самоствердження, визначає стиль поведінки як у групі однолітків, так і з дорослими.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз вітчизняних і закордонних науково-технічних розробок показав, що недостатньою мірою приділяється увага проектуванню взуття для дітей-школярів, зокрема з врахуванням критеріїв якості та конкурентоспроможності взуття.

Створення та широке використання САПР при рішенні завдань взуттєвої галузі відкриває нові перспективи і можливості для вдосконалення етапів і процесів проектування взуття. Однак системи автоматизованого проектування в основному створені для серійного виробництва взуття і масового споживача [2]. При цьому існуючі САПР орієнтовані на проектування одягу для дорослих та не враховують особливості розвитку організму дітей-школярів.

Роботи [3–5] присвячені вдосконаленню процесу проектування взуття для дітей, методів маркетингових досліджень ринку споживачів і автоматизації процесу формування асортиментних колекцій взуття. Однак цілий ряд питань, рішення яких необхідно при проектуванні взуття для дітей-школярів, вимагає свого уточнення та подальшого розвитку. Залишаються актуальними проблеми комплексного врахування конструктивних ознак взуття та естетичних властивостей виробу.

Усунення існуючих недоліків в асортименті та конструкції взуття для дітей-школярів дозволять забезпечити його комфортність і підвищать якість виробів.

### Формулювання мети дослідження

Метою досліджень є визначення та формування пріоритетного композиційно-конструктивного ряду



взуття для дітей-школярів. Передбачається встановити вплив конструктивних ознак та естетичних показників взуття на вибір його споживачами. Це дасть змогу підвищити якість, конкурентоздатність взуття та у подальшому застосувати при розробці основ автоматизованого проектування взуття для дітей-школярів.

#### Викладення основного матеріалу

Взуття для вікової групи 10–15 років відрізняється від решти дитячого взуття, оскільки у такому взутті простежуються деякі елементи модних тенденцій для дорослих і, одночасно, відображаються актуальні стилі молодіжних субкультур. В конструкції взуття може виявитися велика кількість композиційних елементів, які розвиваються відносно один одного паралельно, перетинаючись або навіть рухаючись в протилежному напрямку. Тому процес проектування взуття для дітей-школярів вимагає особливого підходу, зокрема використання конструктивних ознак та естетичних характеристик – композиційно-конструктивних рішень.

На рисунку 1 показано складові композиційно-конструктивного рішення взуття для дітей-школярів.

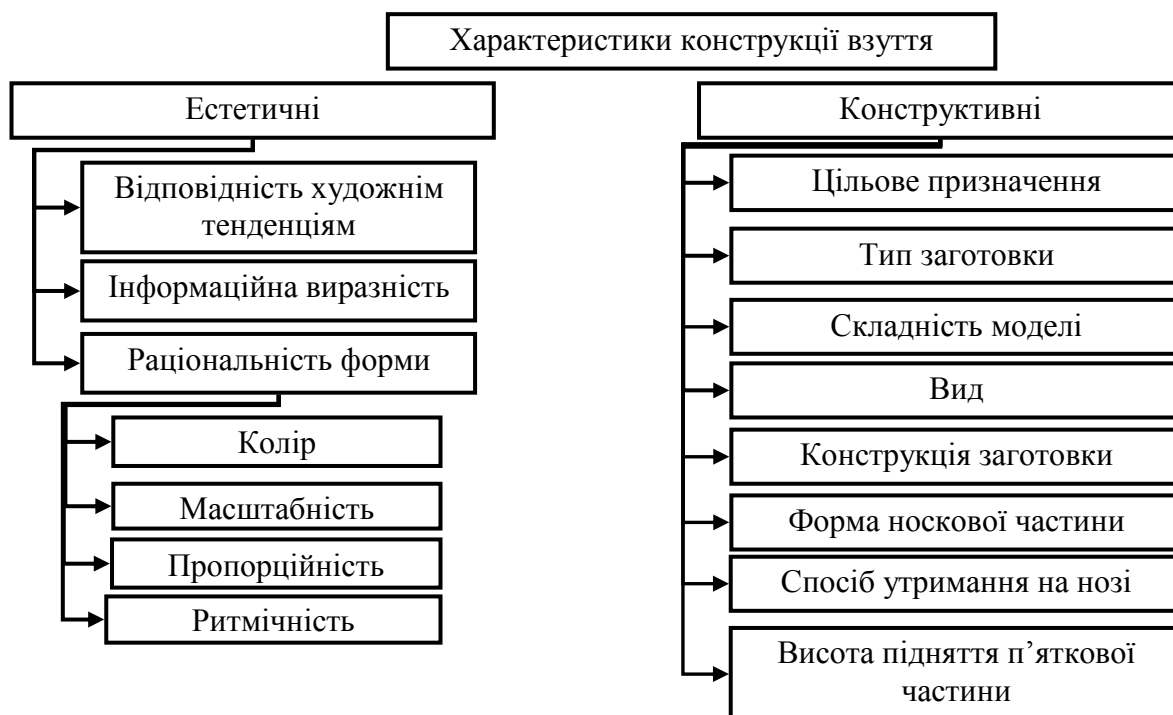


Рис.1. Складові композиційно-конструктивного рішення взуття

Виготовлення взуття неможливе без статистичних даних, які складають основу для зміни конструкції, форми, застосування різних декоративних елементів. Тому періодично серед респондентів-споживачів продукції проводять анкетування, це сприяє зростанню попиту та пропозиції [6].

Для створення конструкції взуття, яке б користувалося великим попитом на ринку України серед дітей-школярів, необхідно дослідити показники, які впливають на психологію вибору споживача того чи іншого виробу. Необхідно визначити, на які композиційно-конструктивні показники звертають увагу в першу чергу діти-школярі при покупці взуття та що для них є важливим у конструкціях взуття. Для визначення вагомих показників передбачено проведення анкетування із застосуванням методу експертних оцінок, який дасть можливість аналітично визначити та представити графічно важливість показників. Для досягнення правильних та точних результатів було розроблено анкету опитування.

Для отримання достовірних даних керувалися такими положеннями:

- питання були чіткі та зрозумілі респондентів і не допускалися двозначності. У тексті анкети використовувалася загально визнана термінологія.

- всі питання були згруповані у певні блоки відповідно до логіки дослідження.
- анкета була лаконічною та містила оптимальну кількість запитань, не було зайвих питань.
- при проведенні анкетуванні психологічний мікроклімат респондентів був позитивним.

Отримані результати анкетування групувалися за наступними критеріями:

- стать (дівчатка, хлопчики);
- вік (11 – 13 років).

На основі рисунку 1 було сформульовано перелік основних композиційно-конструктивних характеристик взуття, на які в першу чергу звертають увагу діти-школярі.

Взуття для дітей-школярів повинно бути привабливим та гармонійним, бути відповідним художнім тенденціям, тому що саме в цьому віці формується психологія особистості та естетичне сприйняття світу. Однак цей показник є досить важким у сприйнятті, тому до переліку запитань анкети він не висувався.

Інформаційна виразність взуття – це здатність його через особливі форми відображати суспільно-

естетичні уявлення, тобто сучасність виробу. У свою чергу, інформаційна виразність поділяється на такі складові: знаковість; оригінальність, стильова відповідність, відповідність модним тенденціям. Знаковість – це здатність конструкції взуття викликати певні почуття в людини, створювати йому потрібні настрої, відображення у формі виробу різних естетичних ідей і уявлень, оскільки почуття та уявлення у дітей-школярів є досить хиткими, тому цей показник не знайшов відображення у дослідженнях. Оригінальність – естетичний показник, який характеризує своєрідність конструкції, яка обумовлює відмінності від виробів аналогічного призначення. Однак слід зауважити, що своєрідна форма конструкції повинна відповідати призначенню взуття, матеріалу, забезпечувати необхідну зручність. Відповідність моді – зовнішній вигляд товару й тимчасово пануючі естетичні смаки. Для одягу, взуття, прикрас відповідність моді – важливий показник, що визначає характер попиту й задоволення потреб. Цілісність композиції – естетичний показник, який характеризує раціональність використання композиційного рішення об'єкта, органічний взаємозв'язок елементів форми виробу, його погодженість із іншими виробами.

Основними характеристиками, які дозволяють оцінити цілісність композиції є організованість об'ємно-просторової структури, тектонічність, пластичність, наявність графічних і образотворчих елементів, масштабна, ритмічна та пропорційна організованість, колір. Запропоновано використовувати у анкетуванні такі показники, як наявність графічних і образотворчих елементів, ритм та колір, оскільки вони найбільш характеризують особливості візуально-емоційного сприйняття дітей-школярів [7].

Конструктивні характеристики були обрані, керуючись знаннями дітей-школярів про взуття. Тому було запропоновано в анкеті такі показники: вид, складність конструкції, конструкція заготовки, форма носкової частини, спосіб утримання на нозі та висота підняття п'яткової частини.

При цьому повинно не тільки оцінити вагомість показників, а й обрати елементи композиційно-конструктивних характеристик, які найбільш привертають їхню увагу при виборі взуття (ця інформація потрібна для створення нової колекції).

Перелік показників:

$x_1$  – колір – модні кольори сезону, яскраві-кислотні кольори, поєднання безлічі різних кольорів, класичний чорний та білий.

$x_2$  – оригінальність (декоративне оздоблення) – стрази, банти, шипи, намистини, квіти, каміння, вишивка, перфорація, бахрома, пір'я, стрічки, масивні замки, фірмові написи, металеві вставки.

$x_3$  – відповідність модним тенденціям – взуття яке відповідає модним тенденціям.

$x_4$  – наявність графічних і образотворчих елементів (модні принти) – квіткові, смужка, клітинка, горошок, різноманітні смішні малюнки.

$x_5$  – спосіб кріплення на нозі – шнурівка, ремінці, застібка-блискавка, еластична тасьма, стрічка Velcro.

$x_6$  – висота піднятості п'яткової частини – високий каблук, середній каблук, низький каблук.

$x_7$  – конструкція взуття – з відрізними деталями, з суцільними деталями.

$x_8$  – ритм.

$x_9$  – складність моделі – класична, модельна.

$x_{10}$  – форма носкової частини – заокруглена, овальна, загострена, квадратна.

Також було запропоновано анкету для батьків, опитуваних дітей-школярів, яка складалася з аналогічних запитань. Анкета створювалася з метою порівняння та визначення наскільки відрізняються між собою вимоги до взуття різних категорій. Оскільки, діти є матеріально залежними від дорослих та без їх думки, самостійно не можуть придбати взуття (цю особливість потрібно обов'язково врахувати).

Отже, розроблені анкети були попередньо протестовані, відформатовані і скореговані та бути використані для проведення опитування та визначення найвагоміших показників для формування пріоритетного композиційно-конструктивного рішення взуття для дітей-школярів

Для дослідження було обрано метод експертних оцінок, який найчастіше використовується для визначення номенклатури різних показників у легкій промисловості, це науково обґрунтований інструмент оцінки і прогнозування модних тенденцій. За допомогою цього методу можна отримати інформацію від великих груп учасників та визначити необхідні показники [8].

Експерти присвоїли показникам ранги від 10 до 1. Тобто, найвагомішому показникові присвоюється ранг  $R = 10$ , а найменшому – ранг  $R = 1$ .

Отримані анкети, загальна кількість котрих забезпечила необхідну точність, при якій помилка не перевищувала 5%, оброблялись з використанням розроблених модулів. За допомогою цих модулів проведено наступні операції: ранжування дослідних даних; визначення коефіцієнта конкордації; визначення середньої суми рангів для усіх показників; визначення величини, що вираховує однакові оцінки різних показників окремими експертами; визначення коефіцієнта вагомості.

Результати досліджень свідчать про те, що діти-школярі, а саме дівчата керуються при виборі взуття такими показниками:

$x_1$  – колір;

$x_2$  – оригінальність (декоративне оздоблення);

$x_5$  – спосіб кріплення на нозі;

$x_7$  – конструкція взуття;

$x_9$  – складність моделі;

$x_{10}$  – форма носкової частини.

Хлопці надають перевагу таким показникам як:

$x_1$  – колір;

$x_4$  – наявність графічних і образотворчих елементів (модні принти);

$x_7$  – конструкція взуття;

$x_8$  – ритм;

$x_9$  – складність моделі;

$x_{10}$  – форма носкової частини.

Результати вагомості показників представлені на рисунках 2 та 3.

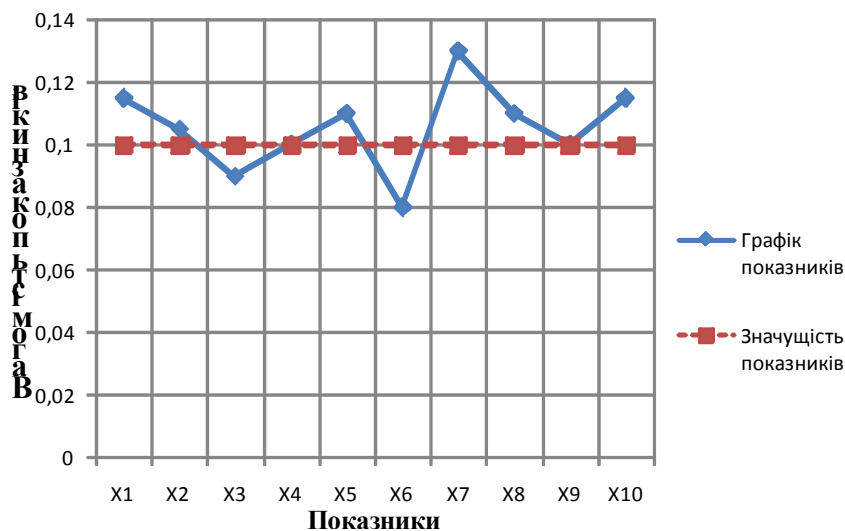


Рис. 2. Вагомості показників для дівчат-школярів

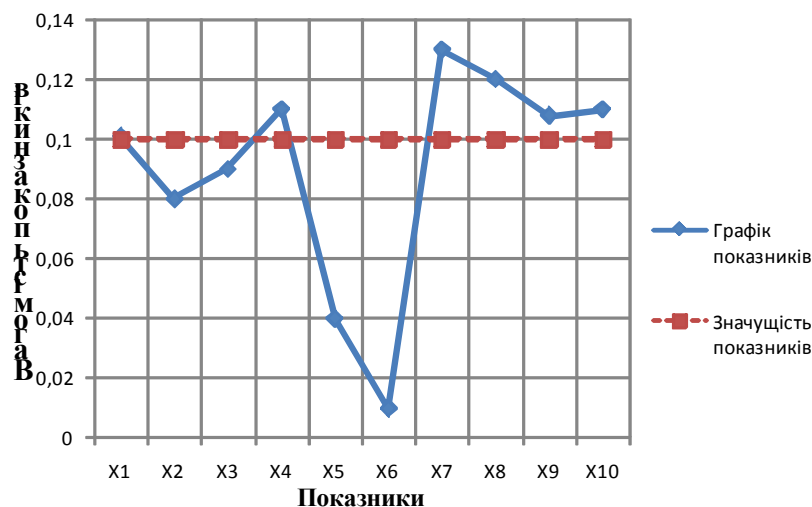


Рис. 3. Вагомості показників для хлопців-школярів

Результати проведеного опитування показали, що для діти-школярі приділяють значну увагу естетичним показникам. Тому при створенні асортименту взуття для цього сегменту покупців необхідно приділяти увагу естетичності конструкції, однак при цьому слід враховувати анатомічні особливості стоп дітей-школярів та конструктивні особливості.

Друга група експертів, тобто батьки при виборі взуття керуються такими показниками:

$x_1$  – колір;

$x_2$  – оригінальність (декоративне оздоблення);

$x_3$  – відповідність модним тенденціям;

$x_4$  – наявність графічних і образотворчих елементів (модні принти);

$x_5$  – спосіб кріплення на нозі;

$x_6$  – висота піднятості п'яткової частини;

$x_{10}$  – форма носкової частини.

На рисунку 4 показані результати досліджень для цієї групи експертів.

Обробка результатів опитування показала, що батьки при виборі взуття для своєї дитини звертають увагу не тільки естетичні показники, але й на конструктивні. Це свідчить про те, що необхідно поєднувати означені показники при створенні взуття для дітей-школярів.

При опитуванні респондентам також пропонувалося не лише обрати важливий для них показник, а й охарактеризувати його. Ця інформація дозволить більш детально визначити, які саме характеристики запропонованих показників найбільш доцільніше використовувати при проектуванні взуття. Результати цих досліджень будуть висвітлені у подальших публікаціях.

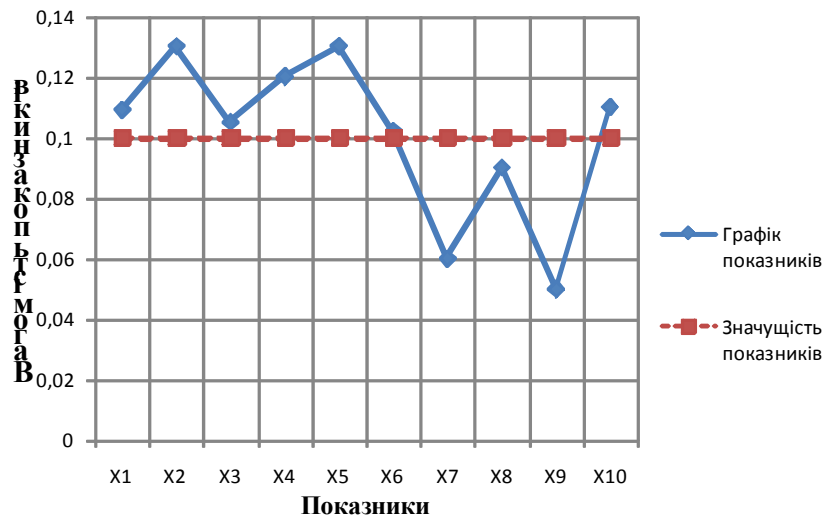


Рис. 4. Вагомості показників для батьків

### Висновки

1. Сформовано систему критеріїв, які визначають пріоритетне композиційно-конструктивне рішення взуття для дітей-школярів.
2. Отримано достовірну інформацію, про те, які естетичності та конструктивні показники в першу чергу впливають на вибір споживачів при покупці взуття.

### Література

1. Надопта Т.А. Загальні критерії якості взуттєвих виробів для дітей-школярів / Т.А. Надопта, А.Б. Домбровський, О.В. Скідан // Вісник ХНУ. – 2014. – № 4. – С. 215–221
2. Пономарева И. В. Анализ функциональных возможностей САПР обуви и кожгалантерейных изделий / И. В. Пономарева, И. И. Мруз // Вісник КНУТД. – 2007. – № 3. – С. 131–134.
3. Черенкова С.С. Обувь для подростков и современные требования валеологии / С.С. Черенкова, Н.В. Бекк // Кожа и обувь. 2008. – № 1. – С. 16–18.
4. Бекк М.В. Разработка методики прогнозирования ассортимента детской обуви : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.06 / БЕКК Мария Владимировна. – М., 2013. – 176 с.
5. Михайловська О. А. Удосконалення конструкції дитячого спеціального взуття для спортивних танців : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.18 / Михайловська Оксана Анатоліївна. – Хмельницький, 2010. – 198 с.
6. Иванов М.Н. Влияние конструктивно-технологических характеристик обуви на ее потребительскую оценку / М.Н. Иванов, Н.А. Голубева, Ю.Н. Гнездилов // Кожевенно-обувная пром-сть. – 2000. – № 5. – С. 32–33.
7. Стрілько В. В. Формування естетичних смаків старшокласників у роботі загальноосвітньої школи. / В.В. Стрілько. – Харків : Колегіум, 2011. – 252 с.
8. Паніна Н.В. Технологія соціологічного дослідження / Н.В. Паніна. – К. : Наукова думка, 1996. – 233 с.

### References

1. Nadopta T.A. Zahalni kryterii yakosti vzuttievykh vyrobiv dlia ditei-shkoliariv / T.A. Nadopta, A.B. Dombrovskiy, O.V. Skidan // Visnyk KhNU. – 2014. – № 4. – S. 215-221
2. Ponomareva Y. V. Analiz funktsyonalnykh vozmozhnopei SAPR obuvy y kozhhalantereinykh yzdelyi / Y. V. Ponomareva, Y. Y. Mruz // Visnyk KNUVD. – 2007. – № 3. – S. 131-134.
3. Cherenkova S.S. Obuv dlia podrostkov y sovremennye trebovaniya valeolohyy / Cherenkova S.S., Bekk N.V. // Kozha y obuv. 2008— №1 - s. 16 - 18.
4. Bekk M.V. Razrabotka metodyky prohnozyrovaniya assortymenta detskoj obuvy: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.19.06 / dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.19.06 / BEKK Maryia Vladymyrovna. – M., 2013. – 176 s.
5. Mykhailovska O. A. Udoshkonalennia konstruktсии dytiachoho spetsialnoho vzuttia dlia sportyvnykh tantsiv: dys. ...kand. tekhn. nauk: 05.18.18 / Mykhailovska Oksana Anatoliivna – Khmelnytskyi, 2010. – 198 s.
6. Yvanov M.N. Vlyianye konstruktivno-tekhnolohycheskykh kharakterystyk obuvy na ee potrebytelskuiu otsenku / M.N. Yvanov, N.A. Holubeva, Yu.N. Hnezdylov // Kozhevenno-obuvnaia prom-st. – 2000. – № 5. – S. 32-33.
7. Strilko V. V. Formuvannia estetychnykh smakiv starshoklasnykiv u roboti zahalnoosvitnoi shkoly. /V.V. Strilko – Kharkiv: Kolehium, 2011. – 252 s.
8. Panina N.V. Tekhnolohiia sotsiolohichnoho doslidzhennia / N.V. Panina. K.: Naukova dumka. 1996. 233s.

Рецензія/Peer review : 19.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.

УДК 675.6.033.96

Н.Б. ХЛЄБНІКОВА, Н.В. ОМЕЛЬЧЕНКО

Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»

А.Г. ДАНИЛКОВИЧ

Київський національний університет технологій та дизайну

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ХУТРЯНОГО ВЕЛЮРУ ЗІ ШКУРОК НУТРИЇ

Доведено можливості використання шкурок нутрії для виробництва хутряного велюру. Здійснено розрахунки комплексного показника якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, оброблених за різними технологіями. Підтверджено, що гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії має вищий комплексний показник якості, порівняно з хутряним велюром зі шкурок нутрії, обробленим за традиційною технологією. Застосування методу поверхневого змочування розбризкуванням зафіксувало більш значну різницю між комплексними показниками якості вказаних зразків. Встановлено, що використання гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії є перспективною можливістю розширення асортименту одягових виробів.

Ключові слова: гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії, комплексний показник якості, споживні властивості.

NATALIYA KHLIEBNIKOVA, NATALIA OMELCHENKO

Higher educational institution of Ukoopspilka «Poltava University of Economics and Trade»

ANATOLIY DANYLKOVSCH

Kyiv National University of Technologies and Design

### COMPLEX ASSESSMENT OF THE NUTRIA FUR VELOUR QUALITY

*Abstract – The possibility of nutria pelts using for the fur velour production is proved. The complex rate calculations of nutria fur velour quality treated with different technologies are done. It is confirmed that hydrophobic nutria fur velour has higher complex quality rate in comparison with nutria fur velour which is treated with traditional technology. The method application of surface damping by sprinkling registered more significant difference between complex quality rates of mentioned samples. It is found that the application of hydrophobic nutria fur velour is a perspective possibility of assortment enlargement of clothes production.*

*Keywords: hydrophobic fur velour from nutria, a composite index of quality, consumer properties.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Проблема пошуку альтернативних можливостей використання ресурсів з залученням різних видів хутровини є актуальною і зумовлює потребу у застосуванні нових способів, технологій обробки з метою надання цій сировині споживних властивостей, які здатні задовольнити потреби найвибагливіших споживачів.

Традиційно хутро нутрії застосовується для виробництва верхнього одягу, а саме для виробництва шуб, пальто, півпальто, френчів, жакетів, жилетів, манто, курток жіночих. Хутро нутрії за незначної ваги, має високу зносостійкість, високу міцність, водовідштовхувальні та теплозахисні властивості. Однак, іноді частина такої цінної сировини має недостатньо розвинений волосяний покрив, а саме, недостатньо розвинуту ость та пух. За таких обставин ця сировина може слугувати основою для пошиття одягу шкірною тканиною назовні. Позитивним є те, що навіть в разі наявності окремих дефектів і пороків шкірної тканини, їх можливо усунути шліфуванням, та отримати напівфабрикат з поліпшеними естетичними властивостями. Цей напівфабрикат має тонку шкірну тканину, що сприятиме подальшому розширенню асортименту фасонних виробів через реалізацію додаткових можливостей у застосуванні особливих видів крою, зокрема драпіруванні виробів. При цьому, важливим є надання хутряному велюру зі шкурок нутрії відповідних показників міцності та водостійкості. Вирішення поставленого завдання може забезпечити отримання одягових виробів з хутряного велюру зі шкурок нутрії, які завдяки своїм споживним властивостям можуть експлуатуватися в осінньо-зимовий період в умовах підвищеної вологості та мокрого снігу. Це є актуальним для споживачів, що географічно формують відповідні кліматичні сегменти ринку, особливо в умовах інтеграційних процесів України з ЄС та пріоритетності експорту продукції поглибленої переробки хутряної і шкіряної сировини та поступової відмови від застосування давальницьких схем сировинного забезпечення виробництва.

**Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор.** Обґрунтовано застосування комплексного методу оцінки якості продукції, яке дозволяє в сукупності оцінити всі найважливіші показники якості на всіх стадіях життєвого циклу продукції [1].

Враховувати значну кількість вимог, розглядати різні властивості матеріалів і показники їх якості необхідно при виборі матеріалів для швейних виробів різного асортименту [2]. Для вибору оптимального варіанту проводилася їх порівняльна оцінка. Доводилося, що для одночасного врахування різних показників якості матеріалів їх необхідно об'єднати в один комплексний показник, тобто використовувати комплексну оцінку якості об'єкту.

Комплексна порівняльна оцінка [3] проводилася за значенням комплексного коефіцієнта порівняльної оцінки якості, що розраховувався як середнє геометричне відносних показників – коефіцієнтів досяжності, які формувалися для кожної властивості досліджуваних видів шкір на основі абсолютних показників властивостей з урахуванням найкращого значення показника серед усіх видів шкір, а також мінімально допустимого значення показника, заданого нормативним документом.

Дослідженню кількісних методів оцінки якості хутра присвячено значну кількість робіт, а саме праці проф. Б.А. Кузнецова, проф. Б.Ф. Церевітінова, проф. В.А. Пчеліна і Т.А. Шмельової, проф. Ш.К. Ганцова, проф. А.Н. Беседіна та ін. Запропоновано різні методи оцінки сорту хутро-хутряної шкурки. Питанням розробки кваліметричного методу оцінки сорту хутра присвячена також робота [4], де пропонується власний погляд щодо розв'язання даної проблеми, що стоїть перед хутряним товарознавством через усереднену величину універсальних показників стану волосяного покриву.

Розроблено [5] методики оцінки властивостей по термомеханічним кривим, змін лінійних розмірів і товщини під дією тепла і вологи, а також різноусадковості шарів, які дозволяють отримувати відомості щодо деформаційних властивостей шкіряної тканини хутра та виявити вплив основних технологічно факторів: тепла, вологи і зовнішніх механічних навантажень на зміну властивостей хутряних шкурок. Це дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу в процесі виготовлення виробів, на основі чого управляти якістю готового одягу.

Аналіз літературних джерел показує, що дослідженню підлягали окремі показники якості хутра, вивчалися окремі властивості шкіряної тканини хутра із застосуванням специфічних методик, здійснювалася комплексна порівняльна оцінка близьких за природою натуральних матеріалів чи матеріалів для виробництва виробів іншого призначення. Питання комплексної оцінки якості хутряного велюру зі шкурок нутрії для одягових виробів є актуальним з причини необхідності підвищення рівня задоволеності потреб споживачів у одязі з натуральних матеріалів та необхідності надання виробам, що виготовляються з них, належної якості.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** В межах проблеми ресурсного забезпечення хутряної промисловості сировинними матеріалами для пошиття нагольних виробів, потрібно врахувати кілька напрямків пошуку. У попередніх дослідженнях розглядалося питання кількісного збільшення обсягів традиційних джерел сировини на основі впровадження сучасної Концепції розвитку тваринництва; питання застосування інноваційних технологій щодо сировини цих джерел. На нашу думку, одним зі шляхів повинна стати можливість застосування диверсифікованого підходу, який передбачає реалізацію стратегії: «види хутровини – нові технології», а саме, стратегії «хутряний велюр зі шкурок нутрії – гідрофобізація». Запропоновані технологічні прийоми нададуть можливість використовувати шкурки нутрії з недорозвиненим хутровим покривом для виготовлення нагольних виробів, і тим самим розширити асортимент хутряного одягу і задовольнити потреби споживачів.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою дослідження є здійснення комплексної оцінки рівня якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, обробленого за традиційною та запропонованою технологіями. Завдання дослідження:

- встановити градації розмірних, безрозмірних одиничних показників якості з урахуванням градації функції їх бажаності;
- визначити безрозмірні одиничні показники якості на основі розмірних та значення функції бажаності для одиничних показників;
- розрахувати комплексний показник якості;
- здійснити порівняльну оцінку рівня якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, виготовленого з застосуванням нової та традиційної технологій;
- з'ясувати можливість використання хутряного велюру зі шкурок нутрії, виготовленого за визначеними технологіями, у різних умовах експлуатації;
- надати рекомендації щодо перспектив розширення сировинної бази хутряної галузі за рахунок хутряного велюру зі шкурок нутрії для виготовлення фасонного одягу шкіряною тканиною назовні.

**Матеріали і методи дослідження** Об'єктом дослідження обрано гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії [6]. Для гідрофобізації хутряного велюру використано композицію до складу якої входять  $\alpha$ -алкени  $C_{20-24}$ , полімеризовані з малеїновим ангідридом, і ряд хімічних реагентів [7]. Товарознавчу оцінку хутряного велюру зі шкурок нутрії здійснено за допомогою узагальненої функції бажаності, яка широко використовується для різних об'єктів дослідження [8 – 11].

Комплексну оцінку якості гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії розраховували за формулою:

$$K_j = \sum_{i=1}^k \mu_i / \sum_{i=1}^k \frac{\mu_i}{d_i}, \quad (1)$$

де  $j$  – вид хутряного велюру,  $\mu_i$  – вагомість і показника якості, що розраховували за відношенням

рангів  $\sum_{j=1}^m r_{ij} / \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m r_{ij}$ ,  $k$  – кількість суттєво впливових показників якості хутряного велюру,  $d_i$  – функція бажаності поточної змінної  $y_i$ , що розраховували за формулою (2).

$$d_i = \exp[-\exp(-y'_i)], \quad (2)$$

де  $y'_i$  – безрозмірне значення показника якості  $y_i$ , що визначали за лінійною залежністю:

$$y'_i = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i. \quad (3)$$

Коефіцієнти  $b_0^{(i)}, b_1^{(i)}$  залежностей (3) визначали із систем рівнянь:

$$\begin{cases} y_i^{\text{гірше}} = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i^{\text{гірше}} \\ y_i^{\text{краще}} = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i^{\text{краще}} \end{cases}, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

де  $y_i^{\text{гірше}}, y_i^{\text{краще}}$  – найгірше і найкраще значення показника якості  $y_i$ , відповідно, зменшити яке далі не можливо з причин неможливості його використання за призначенням, збільшити яке не можливо з причин технологічного характеру;

$y_i^{\text{гірше}}, y_i^{\text{краще}}$  – найгірше і найкраще значення безрозмірного показника якості, що визначали за формулами:

$$y_i^{\text{гірше}} = -\ln(-\ln d_{\text{гірше}}), \quad y_i^{\text{краще}} = -\ln(-\ln d_{\text{краще}}), \quad (5)$$

де  $d_{\text{гірше}}$  і  $d_{\text{краще}}$  – гірше і краще значення функцій бажаності для одиничних показників якості.

#### Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Інтервал значень функції бажаності від 0 до 1 було розбито на відрізки, що характеризували поганий (0,00 – 0,37), задовільний (0,37 – 0,62) добрий (0,63 – 0,79), відмінний (0,80 – 1,00) рівні показників якості. Межі значень одиничних показників були обґрунтовані нормативно – технічною документацією, експертними оцінками, науковими публікаціями та результатами проведених досліджень. Рівень «добре» встановлювався як середнє значення показників рівнів «задовільно» та «відмінно» (табл.1).

Таблиця 1

Рівні розмірних важливих показників якості хутряного велюру

позна чення	Показник назва	Градація показника якості			
		погано	задовільно	добре	відмінно
$x_{1,8}$	сумарний тепловий опір хутряного велюру, (град.*кв.м)/Вт	< 0,07	0,07 – 0,27	0,28 – 0,48	$\geq 0,49$
$x_{1,5}$	відносне залишкове видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	>21	21 – 14,5	14,4 – 7,9	$\leq 8$
$x_{3,1}$	колористичне оформлення шкірної тканини і волосяного покриву, бал	< 0,37	0,37 – 0,62	0,63 – 0,79	$\geq 0,80$
$x_{2,4}$	водопромокання шкірної тканини у динамічних умовах, с	< 0	0 – 839	840 – 1679	$\geq 1680$
$x_{1,6}$	відносне пружне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	< 8	8 – 11,4	11,5 – 14,9	$\geq 15$
$x_{2,2}$	паропроникність шкірної тканини, кг/(кв.м*с)	< 1,2	1,2 – 4,64	4,65 – 8,09	$\geq 8,1$
$x_{2,1}$	повітропроникність шкірної тканини, куб.м/(кв.м*с)	< 0,04	0,04 – 0,154	0,155 – 0,269	$\geq 0,27$
$x_{1,2}$	межа міцності при розтягуванні шкірної тканини, МПа	< 0,48	0,48 – 0,79	0,8 – 1,319	$\geq 1,32$
$x_{3,2}$	якість оздоблення шкірної тканини, бал	< 0,37	0,37 – 0,62	0,63 – 0,79	$\geq 0,8$
$x_{1,4}$	відносне повне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	< 19	19 – 23,9	24 – 28,9	$\geq 29$

Об'єднання різних розмірних показників у комплексний показник виконували після переведення розмірних [12] у безрозмірні показники якості (табл. 2). Для цього визначали коефіцієнти рівнянь переведення  $b_0^{(i)}, b_1^{(i)}$  з урахуванням граничних значень функцій бажаності  $d$  (0,37 та 0,8) і відповідних їм значень безрозмірних показників якості, а також найгіршого та найкращого розмірних показників якості.

Таблиця 2

**Безрозмірні показники якості хутряного велюру зі шкурок нутрії**

Показник		Безрозмірні значення показників якості $y'_i$ варіантів хутряного велюру зі шкурок нутрії			
		Гідрофобізованого		контрольного жирування	
		1	1'	2	2'
$x_{1,8}$	сумарний тепловий опір хутряного велюру, (град.*кв.м)/Вт	0,874	0,765	0,729	0
$x_{1,5}$	відносне залишкове видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	1,412	1,177	1,530	0,118
$x_{3,1}$	колеристичне оформлення шкірної тканини і волоссяного покриву, бал	2,242	1,708	1,530	0,818
$x_{2,4}$	водопромокання шкірної тканини у динамічних умовах, с	1,257	0,792	0,052	0
$x_{1,6}$	відносне пружне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	0,874	0,874	0,656	-0,219
$x_{2,2}$	паропроникність шкірної тканини, кг/(кв.м*с)	1,530	0,998	1,242	0,044
$x_{2,1}$	повітропроникність шкірної тканини, куб.м/(кв.м*с)	1,330	0,399	0,599	0,067
$x_{1,2}$	межа міцності при розтягуванні шкірної тканини, МПа	0,383	0,273	0,328	0
$x_{3,2}$	якість оздоблення шкірної тканини, бал	2,242	1,708	1,530	0,818
$x_{1,4}$	відносне повне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	0,306	0,612	0	1,224

Примітка. Варіанти 1, 2 – зразки хутряного велюру зі шкурок нутрії до поверхневого змочування розбризуванням, 1', 2' – після поверхневого змочування розбризуванням.

Для розрахунку комплексного показника якості було обчислено функції бажаності  $d_i$  одиничних показників якості, які для гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії до поверхневого змочування розбризуванням становили:

$$d_{1,8} = \exp[-\exp(-y'_{1,8})] = \exp[-\exp(-0,874)] = \exp[-0,417] = 0,659;$$

$$d_{1,5} = \exp[-\exp(-y'_{1,5})] = \exp[-\exp(-1,412)] = \exp[-0,244] = 0,784;$$

$$d_{3,1} = \exp[-\exp(-y'_{3,1})] = \exp[-\exp(-2,242)] = \exp[-0,106] = 0,899;$$

$$d_{2,4} = \exp[-\exp(-y'_{2,4})] = \exp[-\exp(-1,257)] = \exp[-0,285] = 0,752;$$

$$d_{1,6} = \exp[-\exp(-y'_{1,6})] = \exp[-\exp(-0,874)] = \exp[-0,417] = 0,659;$$

$$d_{2,2} = \exp[-\exp(-y'_{2,2})] = \exp[-\exp(-1,530)] = \exp[-0,217] = 0,805;$$

$$d_{2,1} = \exp[-\exp(-y'_{2,1})] = \exp[-\exp(-1,330)] = \exp[-0,264] = 0,768;$$

$$d_{1,2} = \exp[-\exp(-y'_{1,2})] = \exp[-\exp(-0,383)] = \exp[-0,682] = 0,506;$$

$$d_{3,2} = \exp[-\exp(-y'_{3,2})] = \exp[-\exp(-2,242)] = \exp[-0,106] = 0,899;$$

$$d_{1,4} = \exp[-\exp(-y'_{1,4})] = \exp[-\exp(-0,306)] = \exp[-0,736] = 0,479.$$

Отримані дані та розрахунки функцій бажаності  $d_i$  одиничних показників якості для гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії після поверхневого змочування розбризуванням та хутряного велюру з нутрії контрольного жирування двох варіантів до і після поверхневого змочування розбризуванням відображено у табл. 3.

Таблиця 3

**Функції бажаності одиничних показників якості хутряного велюру зі шкурок нутрії**

Позначення показника	Функції бажаності $d_i$ одиничних показників якості варіантів хутряного велюру зі шкурок нутрії			
	1	1'	2	2'
$x_{1,8}$	0,659	0,628	0,617	0,368
$x_{1,5}$	0,784	0,735	0,805	0,411
$x_{3,1}$	0,899	0,834	0,805	0,643
$x_{2,4}$	0,752	0,636	0,387	0,368
$x_{1,6}$	0,659	0,659	0,595	0,288
$x_{2,2}$	0,805	0,692	0,749	0,384
$x_{2,1}$	0,768	0,511	0,577	0,392
$x_{1,2}$	0,506	0,467	0,487	0,368
$x_{3,2}$	0,899	0,834	0,805	0,643
$x_{1,4}$	0,479	0,581	0,368	0,745

Примітка: Варіанти 1, 2 – зразки хутряного велюру зі шкурок нутрії до поверхневого змочування розбризуванням, 1', 2' – після поверхневого змочування розбризуванням



Розрахунок комплексного показника якості опирається на коефіцієнти вагомості [13] та розрахункову інформацію щодо їх співвідношень з функціями бажаності одиничних показників якості (табл. 3). Результати розрахунку комплексного показника якості наведено у підсумковому рядку табл. 4.

Таблиця 4

## Розрахунок комплексного показника якості хутряного велюру зі шкурок нутрії

позначення	Показник назва	Вагомість показника, $\mu_i$	Розрахункові дані $\mu_i/d_i$ для варіантів хутряного велюру зі шкурок нутрії			
			1	1'	2	2'
$x_{1.8}$	сумарний тепловий опір хутряного велюру, (град.*кв.м)/Вт	0,125	0,190	0,199	0,203	0,340
$x_{1.5}$	відносне залишкове видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	0,123	0,157	0,167	0,153	0,299
$x_{3.1}$	колористичне оформлення шкірної тканини і волосяного покриву, бал	0,122	0,136	0,146	0,152	0,190
$x_{2.4}$	водопромокання шкірної тканини у динамічних умовах, с	0,107	0,142	0,168	0,276	0,291
$x_{1.6}$	відносне пружне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	0,105	0,159	0,159	0,176	0,365
$x_{2.2}$	паропроникність шкірної тканини, кг/(кв.м*с)	0,099	0,123	0,143	0,132	0,258
$x_{2.1}$	повітропроникність шкірної тканини, куб.м/(кв.м*с)	0,084	0,109	0,164	0,146	0,214
$x_{1.2}$	межа міцності при розтягуванні шкірної тканини, МПа	0,082	0,162	0,176	0,168	0,223
$x_{3.2}$	якість оздоблення шкірної тканини, бал	0,078	0,087	0,094	0,097	0,121
$x_{1.4}$	відносне повне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа, %	0,075	0,157	0,129	0,204	0,101
Разом		$\sum_{i=1}^k \frac{\mu_i}{d_i}$	1,422	1,546	1,707	2,401
Комплексний показник якості хутряного велюру з нутрії, $K_j$		$\sum_{i=1}^k \mu_i / \sum_{i=1}^k \frac{\mu_i}{d_i}$	0,703	0,647	0,586	0,417

Примітка: Варіанти 1, 2 – зразки хутряного велюру зі шкурок нутрії до поверхневого змочування розбризуванням, 1', 2' – після поверхневого змочування розбризуванням

Характеризуючи отримані результати, перш за все, можемо підкреслити, що гідрофобізація хутряного велюру призводить до значного покращання якості хутряного велюру зі шкурок нутрії. За комплексним показником якості гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії за градацією показника бажаності Харінгтона має «добру» оцінку, в той час як комплексний показник якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, виробленого за традиційною технологією складає 0,586, що свідчить про «задовільний» рівень якості.

Застосування методики комплексного оцінювання додатково дає можливість отримати інформацію щодо впливу окремих показників якості хутряного велюру на комплексний показник якості і, таким чином, визначити, які одиничні показники спричинили зменшення рівня комплексного показника якості і за рахунок яких одиничних показників відбулося його збільшення. Негативний вплив на комплексний показник якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, виробленого за традиційною технологією спричинюють: показник відносного повного видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа – 0,368, який визначає низькі деформаційні властивості, показник водопромокання шкірної тканини у динамічних умовах – 0,387, який характеризує гігієнічні властивості та показник межі міцності при розтягуванні шкірної тканини – 0,487, що впливає на механічні властивості гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії. Ці показники є наближеними до нижньої межі «задовільного» рівня. Позитивний вплив на комплексний показник якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, виробленого за традиційною технологією, зумовлюють показники, що впливають на естетичні властивості, а саме колористичне оформлення шкірної тканини і волосяного покриву та якість оздоблення шкірної тканини, та на деформаційні властивості – показник відносного залишкового видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа. Вони мають «відмінний» рівень якості.

Гідрофобізація хутряного велюру відзначилася на покращанні не тільки комплексного показника якості, а і на одиничних його показниках. Частково нівельовано негативний вплив на комплексний показник якості хутряного велюру зі шкурок нутрії показника відносного повного видовження шкірної тканини при

напруженні 9,8МПа – функція бажаності якого зросла до 0,479 та показника межі міцності при розтягуванні шкірної тканини – зростання функції бажаності до 0,506. Ці показники хоч і мають «задовільний» рівень, однак, за градацією показників якості, в результаті впливу алкен-малеїнової композиції на структуру колагену дерми, вони наближаються до «доброго» рівня. Особливо актуальним для нашого дослідження має той факт, що функція бажаності показника водопомокання шкірної тканини у динамічних умовах завдяки застосуванню нової технології гідрофобізації зросла майже вдвічі і має рівень, наближений до відмінного (функція бажаності складає 0,752). Крім того позитивний вплив на комплексний показник якості гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії

справив показник повітропроникності шкірної тканини, що впливає на гігієнічні властивості, функція бажаності якого також наближена до «відмінного» рівня (0,768). «Відмінний» рівень за функцією бажаності мають показники колористичного оформлення шкірної тканини і волосяного покриву та якості оздоблення шкірної тканини, які визначають високі естетичні властивості (0,899), а також показник паропроникності, що характеризує гігієнічні властивості хутряного велюру, гідрофобізованого алкен-малеїновою композицією (0,805).

Вивчено вплив умов експлуатації на зміну комплексного показника якості хутряного велюру зі шкурок нутрії. Поверхневе змочування розбризкуванням, що моделює процес експлуатації хутряного велюру зі шкурок нутрії, призводить до незначного погіршення якості хутряного велюру за градацією Харингтона. Гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії залишається на «доброму» рівні, хутряний велюр зі шкурок нутрії, вироблений за традиційною технологією – на «задовільному» рівні. Прослідковується уповільнення зниження якості через застосування гідрофобізації на 21 %. Для гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії рівень якості знижується на 8 %, для хутряного велюру зі шкурок нутрії, виробленого за традиційною технологією, зниження рівня якості складає 29%, що впритул наближає негідрофобізований велюр, який має комплексний показник якості 0,417 до «поганої» оцінки, верхня межа якої складає 0,37.

Розглядаючи вплив одиничних показників якості хутряного велюру зі шкурок нутрії, виробленого за традиційною технологією після поверхневого змочування розбризкуванням, на комплексний показник якості можемо відмітити, що за рахунок позитивного впливу показників, що визначають естетичні властивості (функція бажаності яких становить 0,643) та показника відносного повного видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа (0,745) він набув не найнижчого (за градацією функції Харингтона) значення «задовільного» рівня якості. Ці показники компенсували негативний вплив частини важливих одиничних показників, таких як сумарний тепловий опір хутряного велюру (0,368), межа міцності при розтягуванні шкірної тканини (0,368), водопомокання шкірної тканини у динамічних умовах (0,368), відносно пружне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа (0,288). Безрозмірне значення показника відносного пружного видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа навіть має від'ємне значення, що свідчить про надзвичайно низький рівень деформаційних характеристик, одяг з такого велюру за умов підвищеної вологості та динамічних навантажень безповоротно втрачатиме форму, а тому може стати навіть непридатним до експлуатації за цим показником якості, не зважаючи на перераховані вище позитивні впливи.

Гідрофобізація усуває проблему низьких рівнів якості одиничних показників навіть за умов підвищеної вологості. Кількісні значення функції бажаності за одиничними показниками якості покращується і такі показники, як сумарний тепловий опір хутряного велюру, водопомокання шкірної тканини у динамічних умовах, відносно пружне видовження шкірної тканини при напруженні 9,8 МПа набувають «доброї» оцінки та зумовлюють аналогічне покращання комплексного показника якості гідрофобізованого хутряного велюру зі шкурок нутрії до рівня 0,647.

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку**

Гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії має значно вищі рівні комплексного показника якості, порівняно з хутряним велюром зі шкурок нутрії, виготовленим за традиційною технологією; характеризується «добрим» рівнем якості, тоді як хутряний велюр зі шкурок нутрії, виготовлений за традиційною технологією має «задовільний» рівень якості.

Гідрофобізований хутряний велюр зі шкурок нутрії може використовуватися в умовах підвищеної вологості, низьких температур та динамічних навантажень.

Хутряний велюр зі шкурок нутрії, гідрофобізований алкен-малеїновою композицією може бути рекомендованим для виготовлення фасонного одягу шкірною тканиною назовні.

В подальших дослідженнях намічається здійснити розрахунок рівня економічної та соціальної ефективності від впровадження запропонованої технології гідрофобізації хутряного велюру зі шкурок нутрії, що дасть можливість розширити асортимент та забезпечити потреби українського споживача у хутряних виробках.

#### **Література**

1. Граб В.П. Комплексная оценка качества изделий / В. П. Граб // Измерения, испытания, контроль и управление качеством. – М. : Национальный исследовательский университет МИЭТ. – 2012. – № 4. – С. 85 – 90.

2. Ярошук О. В. Комплексна оцінка якості швейних виробів дитячого асортименту підвищеної комфортності / О. В. Ярошук, О. П. Бохонько, О. Ю. Лепікаш // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 6. – С. 210 – 215.
3. Байдакова І.М. Комплексна оцінка якості натуральних шкір для верху взуття / І. М. Байдакова, В. С. Остапчук // Товарознавчий вісник. – 2010. – № 2. – С. 31 – 37.
4. Жуков Ф. В. Обоснование и разработка кваліметрического метода оценки сорта меха [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.08 / Ф. В. Жуков. – М. : РГБ, 2007.
5. Кучерова И. А. Оценка и прогнозирование деформационных свойств кожевой ткани натурального меха [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / И. А. Кучерова. – М. : РГБ, 2003.
6. Шкурки натуральные невыделанные. Технические условия : ГОСТ 2916 – 84. – [Чинний від 1985 – 04 – 01]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. – 9 с. – (Міждержавний стандарт).
7. Пат. на КМ № 38472 Україна. Композиція для гідрофобізації ворсової шкіри, хутряного велюру, шубної овчини і виробів з них / Данилкович А. Г., Хлебнікова Н. Б., Мокроусова О. Р., Петко К. І. – заявл. 08.08.08 ; опубл. 12.01.09, Бюл. № 1.
8. Тарасенко І. О. Комплексна оцінка якості шкіри як складова конкурентоспроможності / І. О. Тарасенко, А. Г. Данилкович // Вісник ДАЛПУ. – 2000. – № 3. – С. 110–114.
9. Краснов Б. Я. Комплексная оценка качества обувных материалов / Б. Я. Краснов, М. М. Бернштейн, Ю. М. Гвоздев. – М. : Легкая индустрия, 1979. – 80 с.
10. Комплексная оценка качества текстильных материалов / [А. Е. Чайковская, Л. В. Полищук, И. С. Галык, Б. Д. Семак]. – К. : Техника, 1989. – 254 с.
11. Оптимизация ассортимента и качества текстильных материалов / И. С. Галык, Д. И. Козьмич, Б. Д. Семак [и др.]. – К. : Техника, 1991. – 174 с.
12. Хлебнікова Н. Б. Оцінювання показників якості гідрофобізованого хутряного велюру з нутрії / Н. Б. Хлебнікова, Н. В. Омельченко, А. Г. Данилкович // Сборник научных трудов SWorld. Технические науки : по матер. междунар. научно-практич. интернет-конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2014», 16–26 дек. 2014 г. – Иваново : Маркова АД, 2014. – № 4 (37). – С. 75 – 85.
13. Данилкович А. Г. Вибір номенклатури показників якості гідрофобізованого хутряного велюру експертним методом / А. Г. Данилкович, Н. Б. Хлебнікова, Н. В. Омельченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харьков : ЧП «Технолог. Центр», Укр. гос. акад. ж.-д. трансп., 2014. – Випуск 5/3 (71). – С. 34 – 39.

## References

1. Grab V.P. Kompleksnaya ocenka kachestva izdelij, Izmereniya, ispy'taniya, kontrol' i upravlenie kachestvom, 2012, No. 4, pp. 85 – 90.
2. Yaroshchuk O. V. Bokhonko O. P., Lepikash O. Yu. Kompleksna otsinka yakosti shveinykh vyrobiv dytiachoho asortymentu pidvyshchenoi komfortnosti, Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu, 2011, No. 6, pp. 210 – 215.
3. Baidakova I.M., Ostapchuk V.S. Kompleksna otsinka yakosti naturalnykh shkir dlia verkhу vzuttya, Tovaroznachnyi visnyk, 2010, No. 2, pp. 31 – 37.
4. Zhukov F.V. Obosnovanie i razrabotka kvalimetricheskogo metoda ocenki sorta mexa, Moskva, RGB, 2007. (Iz fondov Rossijskoj Gosudarstvennoj Biblioteki).
5. Kucherova I.A. Ocenka i prognozirovanie deformacionny'x svojstv kozhevoj tkani naturalnogo mexa, Moskva, RGB, 2003. (Iz fondov Rossijskoj Gosudarstvennoj Biblioteki).
6. Shkurki nutrii nevy'delanny'e. Texnicheskie usloviya, GOST 2916-84, IPK Izdatelstvo standartov, 1997, 9 p.
7. Danylkovych A. H., Khliebnikova N. B., Mokrousova O. R., Petko K. I. Pat. na KM No. 38472 Ukraina. Kompozitsiia dlia hidrofobizatsii vorsovoj shkiry, khutrianoho veliuru, shubnoi ovchyny i vyrobiv z nykh, zaiavl. 08.08.08, opubl. 12.01.09, Biul. No. 1.
8. Tarasenko I. O., Danylkovych A. H. Kompleksna otsinka yakosti shkiry yak skladova konkurentospromozhnosti, Visnyk DALPU, 2000, No. 3, pp. 110 – 114.
9. Krasnov B. Ya., Bernshtejn M. M., Gvozdev Yu. M. Kompleksnaya ocenka kachestva obuvny'x materialov, Moskva, Lyogkaya industriya, 1979, 80 p.
10. Chajkovskaya A. E., Polishhuk L. V., Galy'k I. S., Semak B. D. Kompleksnaya ocenka kachestva tekstilny'x materialov, Kiev, Texnika, 1989, 254 p.
11. Galy'k I. S., Kozmich D. I, Semak B. D. Optimizaciya assortimenta i kachestva tekstilny'x materialov, Kiev, Texnika, 1991, 174 p.
12. Khliebnikova N. B., Omelchenko N. V., Danylkovych A. H. Otsiniuvannia pokaznykiv yakosti hidrofobizovanoho khutrianoho veliuru z nutrii, Ivanovo, 2014, pp. 75-85
13. Danylkovych A. H., Khliebnikova N. B., Omelchenko N. V. Vybir nomenklaturnykh pokaznykiv yakosti hidrofobizovanoho khutrianoho veliuru ekspertnym metodom, Har'kov, ChP «Tekhnoloh. Tsentr», 2014, pp. 34 – 39.

Рецензія/Peer review : 14.1.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.П. Березенко

## ЛЬОН В ІНТЕР'ЄРІ

*Досліджено проблему використання лляної та льономісної пряжі для виробництва інтер'єрного текстилю різного цільового призначення з метою розширення асортименту цих текстильних матеріалів і виробів та забезпечення екологічної безпечності даним виробам. Розкрито роль застосування льону в дизайні інтер'єру приміщень різного призначення. Проведено аналіз публікацій, присвячених характеристиці асортименту та властивостей льономісних текстильних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення.*

**Ключові слова:** інтер'єрний текстиль, оптимальний асортимент, льономісна пряжа, екологічна безпечність, рівень якості, конкурентоспроможність.

H.O. PUSHKAR, B.D. SEMAK

Lviv Commerce Academy

## FLAX IN THE INTERIOR

*The problem of the use of flax and flax-containing yarn for the production of interior textiles for different purposes has been analyzed with the aim to extend the range of textile materials and products and ensure environmental safety of these products. The role of the use of flax in the design of interior space for various purposes has been revealed. Publications devoted to the characterization of the range and properties of flax-containing textile materials and products for interior purposes have been analyzed.*

*Key words:* interior textiles, optimal range, flax-containing yarn, environmental safety, quality level, competitiveness.

**Вступ.** Як свідчить аналіз вітчизняних та зарубіжних ринків текстилю, в екологізації та підвищенні гігієнічності текстильних матеріалів і виробів різного цільового призначення в останні роки суттєво зростає роль луб'яних волокон. Особливо це стосується збільшення обсягів виробництва та розширення асортименту льономісних текстильних матеріалів і виробів одягового, інтер'єрного, спеціального та технічного призначення. В даній роботі ми обмежились розглядом деяких способів підвищення якості та екологізації асортименту льономісних текстильних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення, акцентуючи увагу на пошук шляхів більш ефективного використання власної текстильної сировини та існуючих в країні технологічних можливостей, а також використовуючи накопичені в галузевих науково-дослідних та навчальних закладах досвід вирішення цих завдань.

**Мета роботи:** пошук шляхів розширення, екологізації та оптимізації асортименту льономісних текстильних матеріалів і виробів різних способів виробництва та цільового призначення на основі узагальнення вітчизняного та зарубіжного досвіду, що дозволить адаптувати технології виробництва льономісних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення, структуру асортименту, рівень якості та екологічної безпечності, а також конкурентоспроможності до сучасних вимог зарубіжного ринку.

**Викладення основного матеріалу та його авторська інтерпретація.** Відомо, що сьогодні вже складно уявити собі сучасний асортимент любого виду інтер'єрного текстилю без використання для його виробництва різноманітних видів льономісної сировини. Це стосуються передусім популярних в усьому світі видів столової та постільної білизни, завжди модних портьєрно-шторних матеріалів і виробів, меблево-декоративних матеріалів і виробів, килимових виробів і матеріалів для покриття підлоги та стін і ін. Це і різноманітні за способами виробництва льономісні текстильні підлогові покриття. Використання різноманітної лляної сировини в текстильних матеріалах і виробках інтер'єрного призначення дозволило суттєво розширити та збагатити їх функціональне призначення. Ці матеріали і вироби не тільки сприяють підвищенню художньо-естетичного рівня житлових, адміністративних та громадських приміщень, але й суттєвому поліпшенню та оздоровленню їх мікроклімату. Необхідно відмітити, що серед інших груп текстильних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення (текстильні матеріали для оздоблення вікон і дверей, оббивання та оздоблення меблів, виготовлення постільної і столової білизни) саме льономісні килимові покриви для підлоги і стін відіграють домінуючу роль у формуванні мікроклімату житлових і адміністративних приміщень [1].

Зазначимо, що останніми роками льон довгунець традиційно використовували в основному для виробництва білизняних тканин і тканих поштучних виробів (постільного і столового призначення), а з льону-кудряшу (олійного) переважно виготовляли грубу парусину технічного призначення, то сьогодні з цих волокон виготовляють широкий асортимент інтер'єрних матеріалів різного цільового призначення (килими та килимові вироби, оббивні матеріали, жалюзі, шпалери тощо). Функціональні властивості льономісних текстильних матеріалів забезпечується не тільки за рахунок природних (унікальних) властивостей самого лляного волокна, а також за рахунок цілеспрямованої поверхневої модифікації льономісних текстильних матеріалів. Так, наприклад, забезпечення функціональності для льономісних покривів для підлоги і стін також досягається в основному за рахунок біостійкого, водо- та брудовідштовхувального і вогнезахисного оброблення цих матеріалів і виробів. Все це дозволяє розширити та збагатити асортимент текстильних матеріалів і виробів для покриття підлоги і стін [2–4].

Найбільш актуальним сьогодні є використання лляного волокна для виготовлення різноманітних елітних

(вартісних) екологобезпечних виробів білизняного призначення – простирадл, наволочок, підковдр, комплектів із них, скатерок, серветок, рушників (кухонних, ванних). Це обумовлено низкою причин, а саме [5,6]:

- лляні білизняні вироби за зносостійкістю, гігієнічністю, естетичністю суттєво переважають аналогічні за призначенням бавовняні білизняні вироби;
- широке використання лляного волокна у білизняному текстильному виробництві дозволяє не тільки замінити дефіцитну в нашій країні бавовну, але й суттєво підвищити рівень якості, екологічної безпечності та конкурентоспроможності цієї групи товарів інтер'єрного призначення;
- перспективним є використання в білизняному виробництві лляного катоніну, який може використовуватись у суміші з іншими волокнами (натуральними і хімічними).

Разом з тим, широке використання лляного волокна для вітчизняного виробництва тканин білизняного призначення вимагає вдосконалення технології прядіння цих волокон, а також оздоблення самих тканин. Це стосується передусім [1, 3]:

- підвищення тонини лляної пряжі (особливо з олійного льону) шляхом подальшого вдосконалення системи прядіння лляних коротких волокон;
- впровадження в практику роботи лляних підприємств сучасних ресурсо- та енергозберігаючих технологій вибілювання білизняних матеріалів і виробів;
- цілеспрямованого надання необхідних функціональних властивостей лляним білизняним тканинам і виробам в процесі їх оздоблення (особливо це стосується білизняних виробів дитячого призначення).

Відомо, що лляні волокна у своєму складі містять мікроелементи важких і рідкоземельних металів (Cu, Zn, Mn, Pb, As, Cd і ін.), які надають їм комплекс унікальних медико-біологічних властивостей. Тому з гігієнічної та екологічної точки зору лляні волокна найбільш доцільно використовувати у виробництві текстильних матеріалів і виробів санітарно-гігієнічного, медико-профілактичного та інтер'єрного призначення (особливо постільного та столового).

На нашу думку, успішному розвитку ринку льоновомісних тканин білизняного призначення можуть сприяти такі чинники [1]:

- розширення і подальша оптимізація основних параметрів будови льоновомісних тканин з вмістом бавовняних, віскозних, лавсанових і інших волокон;
- суттєве покращення художньо-естетичного оформлення цих тканин за рахунок підбору більш якісних вибілювачів для фізичного та оптичного вибілювання та обґрунтованого підбору нетоксичних і малотоксичних марок синтетичних барвників для фарбування та друкування цих тканин;
- більш широке застосування спеціальних способів оброблення білизняних льоновомісних тканин з метою надання їм відповідних ефектів брудовідштовхування, біостійкості та інших.

Використання лляних волокон для виробництва текстильних матеріалів для оздоблення вікон і дверей дозволяє [7]:

- підвищити зносостійкість цих матеріалів (особливо світлостійкості);
- покращити рівень їх гігієнічності та екологічної безпечності за рахунок зниження частки в обсягах їх виробництва синтетичних волокон;
- розширити та оптимізувати асортимент фіранкових і порт'єрних текстильних матеріалів різного цільового призначення.

Одним із радикальних шляхів екологізації сировини для килимового виробництва, як свідчить зарубіжний досвід [4, 8, 9], є більш широке використання в килимовому виробництві різних видів луб'яних волокон (лляних, конопляних, джутових і ін.) і змішаної (льоно-вовняної, льоно-бавовняної, льоно-лавсанової, льоно-віскозної, конопляно-лавсанової і ін.) пряжі у поєднанні з різними видами текстурованих ниток і пряжі. Найбільш перспективним для килимового виробництва є використання коротковолокнистого лляного волокна, включаючи і модифіковані на його основі волокна катоніну та новольону. Це обумовлено різними причинами, а саме [10–12]:

- унікальним поєднанням медико-біологічних і еколого-гігієнічних властивостей лляного волокна з його цінними механічними властивостями (високим розривальним навантаженням і стійкістю до стирання), малою електроздатністю і схильністю до забруднення, що сприяє створенню необхідних комфортних умов у житлових і адміністративних приміщеннях;
- можливість вирощування та первинного перероблення коротковолокнистого (олійного) льону в необхідних обсягах у багатьох областях України (особливо у північно-західних);
- наявність власного технологічного обладнання і технологій для виробництва лляної та змішаної дво- і трикомпонентної пряжі килимового призначення та килимових виробів з її застосуванням;
- можливістю перероблення в килимарстві конопляної пряжі і отриманої на основі конопляного волокна змішаної пряжі (конопляно-лавсанової, вовняно-конопляної та ін.).

Для виготовлення високоякісного льоновомісного інтер'єрного текстилю (фіранкового, білизняного, меблевого та килимового призначення) виправданим є використання рослинних барвників замість токсичних марок синтетичних барвників. Як показали результати наших досліджень [13], використання рослинних барвників для фарбування фіранкових матеріалів дозволяє забезпечити текстильним матеріалам екологічну безпечність та надати нові актуальні естетичні властивості цим матеріалам, наприклад, розширити та збагатити колірну гаму забарвлень.

У таблиці наведено асортимент інтер'єрних льономісних матеріалів, що пропонується авторами [2] для широкого освоєння промисловістю України, і вид сировини для їхнього виробництва.

Таблиця 1

**Асортимент інтер'єрних матеріалів з льону для широкого застосування**

Призначення тканини	Поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	Вид сировини
Для постільної білизни	135–215	Чисто лляна пряжа, льономісна пряжа з використанням бавовняного волокна і високомодульного віскозного волокна
Для столової білизни	145–240	
Для лицевих рушників	170–250	
Спеціальне (медичне, залізничного транспорту та ін.)	125–235	Льономісна пряжа на основі використання модифікованого льону з суміші з бавовною, віскозними і лавсановими волокнами та поєднанні з комплексними віскозними та лавсановими нитками
Меблеві	250–410	
Гардинні	145–250	
Для жалюзі, підлогових покриттів, текстильних шпалер	170–360	

Варто зауважити, що окрім своїх унікальних цінних природних властивостей (екологічність, біостійкість тощо), лляні текстильні матеріали характеризуються високою естетичністю, тому є дуже популярними серед фахівців, які займаються текстильним оформленням інтер'єрів [14]. Спеціалісти даної області вважають, що саме за рахунок льону можна створити не тільки сучасний та комфортний, але й екологічний простір житлових та адміністративних приміщень.

Фахівці з оформлення інтер'єрів вважають, що льон в текстильному оформленні інтер'єру має місце абсолютно в будь-якому приміщенні. У вітальній кімнаті льон може бути присутнім в шторах. Віконні ролети, жалюзі, занавіски та фіранки з лляної пряжі в поєднанні віскозними і лавсановими волокнами та додаванням синтетичних металізованих ниток виглядають естетично, модно, елегантно та вишукано. Льономісні текстильні матеріали також застосовують для оббивання меблів, виготовлення меблевих чохлів, в оздобленні подушок, пуфів, декоративних панно тощо.

В інтер'єрі спальні дизайнери виділяють як основний естетичний акцент лляні штори та покривала з льону. Пастельні і теплі відтінки лляного текстилю створюють затишок, комфорт та відчуття спокою у спальній кімнаті. Льон в інтер'єрі спальні може бути присутнім і на підлозі. Наприклад, приліжковий килимок чи функціональні подушки-сидіння з натурального лляного матеріалу забезпечують екологічний мікроклімат, тепло та затишок даного приміщення. Особливо значення, як відомо, має льон у виготовленні постільної білизни. Лляна постільна білизна володіє надзвичайними природними властивостями: екологічність, довговічність, низька здатність до забруднювання та електризації, природна біостійкість.

Також слід відмітити, що лляна білизна, порівняно з бавовняною, вважається більш високоякісною, цінною і сьогодні відноситься до категорії елітних текстильних виробів. Завдяки своїй екологічності льон є оптимальним варіантом і для дизайну дитячої кімнати.

У оформленні кухні льон займає домінуюче місце порівняно з іншими тканинами. З льону виготовляють кухонні скатертини, серветки, рушники, фартухи, прихватки, подушки (або чохла) на стільці, а також лляні кухонні штори та занавіски. Спеціалісти інтер'єрного салону «Будинок Мрії» часто використовують саме льон для вирішення різних дизайнерських завдань в інтер'єрі [14].

Лляне полотно, що використовується для оздоблення інтер'єру, може бути різного тону: вибіленим, кольоровим або ж природного сіро-коричневого відтінку. У дизайні інтер'єру найчастіше використовують не білений льон. Він виглядає більш фактурно і колоритно і в цьому, власне, і полягає його цінність. Крім того, льон може відрізнитися і по текстурі: від тонкої, м'якої та легкої тканини до грубого та досить жорсткого полотна.

Висока популярність льономісного інтер'єрного текстилю, як підтверджує вітчизняна та зарубіжна практика, обумовлена також рядом специфічних властивостей лляних волокон, а саме: їх високою адсорбційною здатністю, низькою електроздатністю та невисокою здатністю до забруднювання, високими механічними властивостями, природною біостійкістю та ін. Тому термін експлуатації багатьох видів лляних інтер'єрних виробів (особливо постільної та столової білизни) є значно довшим, ніж аналогічних бавовняних виробів. До того ж лляні вироби характеризуються кращими та стабільними в експлуатації естетичними властивостями. Наприклад, лляна білизна, на відміну від бавовняної, в процесі багаторазового прання не набуває жовтого відтінку. Висока гігієнічність та екологічна безпечність льономісного інтер'єрного текстилю у поєднанні з його високою атмосферостійкістю, біостійкістю, термостійкістю гарантує йому високу конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішньому ринках [15].

З метою визначення напрямків і тенденцій в розвитку сучасного асортименту льономісного текстилю проведено аналіз публікацій, присвячених характеристиці асортименту та властивостей льономісних текстильних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення за останні роки на вітчизняному та деяких зарубіжних ринках.

Автор роботи [16], оцінюючи стан і перспективи виробництва лляних волокон в Україні, відзначає, що підвищений інтерес до цих волокон в останні роки пояснюється не тільки їх унікальними властивостями, але й відносною дешевизною та доступністю сировини, а також наявністю відповідних кліматичних умов і

земельних ресурсів для її вирощування, чого не має у багатьох зарубіжних країнах. Окрім цього, лляна сировина в останні роки, поряд з різними галузями вітчизняної текстильної промисловості, все ширше використовується в багатьох інших галузях (харчовій, фармацевтичній, целюлозно-паперовій, автомобільній, будівельній та ін.).

В роботі [17] проаналізовано стан та проблеми розвитку льонарства в Україні. Автори відзначають, що стан галузі льонарства у 2013 році (порівняно з попередніми роками) є критичним. Запропоновано напрями реанімації галузі, зокрема, за рахунок збереження та відродження підприємств з переробки льоносировини, збільшення обсягів посівних площ льону. Особливе значення у розвитку лляної галузі належить державній політиці, що має бути скерована на забезпечення прибутковості льоносіючих і льонопереробних підприємств та захист вітчизняного ринку текстильної сировини та текстильних виробів.

В роботі [2] узагальнено результати багаторічних досліджень, проведених в Херсонському національному технічному університеті з метою розширення асортименту та оптимізації властивостей льоновомісних текстильних матеріалів різного цільового призначення, включаючи і асортимент льоновомісної сировини та матеріалів інтер'єрного призначення. Авторами сформульована та обґрунтована нова концепція реструктуризації асортименту текстильних льоновомісних матеріалів різного цільового призначення (одягового, інтер'єрного, спеціального). Саме цей підхід дозволяє максимально приблизити асортимент і властивості вітчизняних льоновомісних текстильних матеріалів інтер'єрного призначення до вимог зарубіжних стандартів і гарантувати їх успіх на зарубіжних ринках.

Також необхідно відмітити, що авторами Херсонського національного технічного університету розглянуто актуальні питання щодо виробництва новітніх нетканих льоновомісних текстильних матеріалів різного цільового призначення, включаючи інтер'єрного. Так, в роботі [18] розглянуто теоретичні та практичні питання, що стосуються розробки інноваційних технологій первинної переробки стебел льону олійного, спрямованих на одержання волокна, технологічні властивості якого дозволяють його використовувати у виробництві нетканих і целюлозовмісних матеріалів широкого функціонального призначення, зокрема меблевого полотна. Наведені технології дозволяють раціонально використовувати дешеву екологічно чисту вітчизняну сировину – солому льону олійного. Авторами встановлено вимоги до якості волокон льону олійного для виробництва нетканих матеріалів. Розроблено технології з оптимізованими параметрами та режимами оброблення на модернізованому куделеприготувальному агрегаті стебел трести льону олійного різних сортів з урахуванням їх технологічних характеристик для одержання волокон з різними фізико-механічними властивостями, придатних для виробництва нетканого та меблевого полотна і льоноватину.

Автори роботи [3] розглядають широкий спектр проблем, пов'язаних з пошуком шляхів екологізації та оптимізації асортименту і підвищення якості текстильних матеріалів різного цільового призначення. При цьому основна увага приділена висвітленню наступних проблем:

- розкриттю ролі сировини та технологій виробництва льоновомісних текстильних матеріалів у формуванні рівня їх екологічної безпечності;
- оцінці впливу льоновомісної сировини на формування асортименту та властивостей текстильних матеріалів різного цільового призначення;
- формування та обґрунтування напрямів перебудови структури асортименту льоновомісних текстильних матеріалів і виробів різного цільового призначення з врахуванням вимог міжнародних екологічних текстильних стандартів.

В роботі [19] науковцями Костромського державного технологічного університету (Росія) розроблено нові автоматизовані методи оцінки показників якості лляних текстильних матеріалів, що дозволить прогнозувати якість цих матеріалів і зберегти унікальні природні властивості лляних волокон.

В роботі [20] розглянуто проблеми виробництва, підвищення якості, а також конкурентоспроможності екологічно безпечного лляного текстилю різного цільового призначення. Визначено основні напрями щодо створення льоновомісного текстилю з новими властивостями.

Авторами роботи [21] проведено дослідження, що стосуються визначення основних факторів зношування в процесі експлуатації лляних тканин білизняного призначення. В якості критерію поступового погіршення властивостей білизняних тканин в процесі експлуатації було обрано розривне навантаження, стійкість до витирання, усадку після прання, незмінність та гіроскопічність. На основі проведених досліджень авторами запропоновано оптимальні варіанти тканин білизняного призначення, які відповідають всім вимогам, що ставляться до виробів даного призначення.

В роботі [22] досліджено основні вимоги та потреби споживачів до меблево-декоративних тканин. Автором на основі опитування споживачів меблево-декоративних тканин розроблена їх одно- і багатовимірною сегментація і типологія. За допомогою факторного, кластерного і перехресного аналізу виявлено і охарактеризовано існуючі типологічні групи споживачів (цільові сегменти). Автором рекомендується враховувати виявлені вимоги споживачів виробничим і торговим підприємствам під час формування властивостей та асортименту меблево-декоративних тканин.

Авторами роботи [23] розглянуто питання, що стосуються підвищення якості меблевих тканин. В якості об'єктів дослідження взяті популярні на ринку меблеві тканини, виготовлені турецькою фірмою «Aydin Tekstil». Зокрема, досліджено стійкість меблевих тканин до стирання, а також досліджено повітропроникність, водопроникність, водопоглинання, гіроскопічність. Встановлено залежність

зазначених показників від волокнистого складу. На основі проведених досліджень, запропоновано варіанти меблевих тканин, які оптимальні за своїм волокнистим складом та властивостями.

Автори роботи [24] розглядають проблеми формування вітчизняного асортименту і якості лляної білизни експортно-імпортного призначення. Особлива увага приділена пошуку шляхів оптимізації асортименту цієї білизни при більш ефективному використанні лляної сировини.

В роботі [25] наведено результати досліджень, що стосуються оптимізації асортименту та властивостей льоновомісних нетканих текстильних матеріалів різного цільового призначення. Зокрема, визначено роль льону олійного в екологізації асортименту нетканих текстильних матеріалів.

Що стосується застосування новітніх видів сировини у виробництві інтер'єрного текстилю, то в роботі [5] нами розглянуто асортимент інноваційних видів сировини для виготовлення постільної білизни. Зазначено, що окрім використання традиційної бавовни для виготовлення постільної та столової білизни, все більш актуальнішим стає використання для її виробництва льону. Крім того, наведено характеристику новітніх видів волокон, які застосовуються для виготовлення білизни – бамбукового волокна, манільського прядива, коноплі, кокосового волокна, джуту, рамі і сизалу, а також волокон-«новинок» у виробництві постільної білизни, таких як кропива; кипарис Хиноки; волокно, виготовлене з торфу та ін.

Відзначимо, що в роботі [6, 7] нами обґрунтовано доцільність більш широкого використання лляного волокна (особливо короткого) для виробництва різних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення. Це дозволяє розширити сировинну базу, поповнити асортимент та суттєво підвищити екологічну безпечність матеріалів і виробів інтер'єрного призначення. Особливо це стосується лляних і льоновомісних тканин білизняного призначення. Крім того, сформульовано основні напрямки оптимізації асортименту, властивостей і якості тканин для постільної та столової білизни шляхом відповідного підбору та обґрунтування окремих їх параметрів будови (волокнистого складу, лінійної густини пряжі, виду переплетення та інших), а також подальшого вдосконалення технології їх оздоблення (вибілювання, фарбування, друкування). Також, розкрито роль стандартизації асортименту та властивостей тканин для постільної та столової білизни в оптимізації структури їх асортименту. Зроблено ряд доповнень до ДСТУ 4239:2003, що стосуються нормування та оцінювання рівня екологічної безпечності названих тканин та виробів з них.

Що стосується більш широкого використання луб'яних волокон у вітчизняній текстильній промисловості, то нами в роботі [26, 27] розглядається дана проблема. Встановлено, що використання різних видів луб'яних волокон під час виготовлення інтер'єрного текстилю дозволить:

- більш ефективно використовувати у вітчизняному виробництві власні ресурси лляних і конопляних волокон для розширення асортименту та збільшення обсягів виробництва текстильних матеріалів і виробів інтер'єрного призначення;
- зменшити потребу у дефіцитному бавовняному волокні за рахунок часткового використання катонізованих луб'яних волокон в суміші з іншими волокнами;
- забезпечити потреби власного ринку екологобезпечними інтер'єрними текстильними матеріалами для постільної білизни, оббивання меблів, оздоблення вікон і дверей, настінних і підлогових покриттів тощо.

### Висновки

Доведено доцільність більш широкого використання лляної та льоновомісної пряжі для поповнення асортименту матеріалів і виробів інтер'єрного призначення. Це дозволить розширити асортимент цих товарів, підвищити їх гігієнічність, екологобезпечність та конкурентоспроможність на вітчизняному ринку інтер'єрного текстилю.

### Література

1. Пушкар Г. О. Інтер'єрний текстиль: товарознавчі аспекти формування асортименту та якості : монографія / Г. О. Пушкар. – Львів : «Магнолія 2006», 2013. – 176 с.
2. Кузьміна Т. О. Якість і стандартизація модифікованих лляних волокон : монографія / Т. О. Кузьміна, Л. А. Чурсіна, Г. А. Тіхосова ; [під ред. Л. А. Чурсіної]. – Херсон : Олді-плюс, 2009. – 416 с.
3. Галик І. С. Проблеми формування та оцінювання екологічної безпечності текстилю : монографія / І. С. Галик, Б. Д. Семак. – Львів : Видавництво Львівської комерційної академії, 2014. – 488 с.
4. Живетин В. В. Лен и его комплексное использование : монографія / В. В. Живетин, Л. Н. Гинзбург, О. М. Ольшанская. – М. : Информ – Знание, 2002. – 400 с.
5. Пушкар Г. О. Постільна екобілизна: сучасний асортимент та властивості / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак / Матеріали І-ї Міжнародної науково-практичної інтернет-конф. «Актуальні проблеми теорії і практики експертизи товарів», 18–20 березня 2014 р. – Полтава : Полтавський університет економіки і торгівлі, 2014. – С. 74–77.
6. Пушкар Г.О. Шляхи оптимізації асортименту та підвищення екологічної безпечності інтер'єрних тканин для постільної і столової білизни / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак // Вісник Київського національного університету технології і дизайну. – 2010. – № 1(51). – С.140–146.
7. Пушкар Г. О. Використання лляного волокна для формування асортименту інтер'єрного текстилю / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак // Вісник Київського національного університету технології і дизайну.



– 2012. – № 2 (64). – С. 91 – 97.

8. Грищенко В. А. Ассортиментный сдвиг в применении грубого короткого льняного волокна [Электронный ресурс] / В. А. Грищенко, Т. Н. Кудрявцева, Е. И. Шаповалова // Рынок легкой промышленности. – 2006. – № 47. – Режим доступа : <http://rustm.net/catalog/article/227.html>.

9. Коропченко С. П. Перспективний напрямок переробки луб'яних культур / С. П. Коропченко // Проблеми легкой и текстильной промышленности Украины. – 2009. – № 1. – С. 72 – 75.

10. Кузьміна Т. О. Формування конкурентоспроможного асортименту льоновомісних виробів / Т. О. Кузьміна // Шляхи відродження галузей льонарства і коноплярства та підвищення ефективності їх наукового забезпечення : зб. наук. пр. міжнар. наук.-прак. конф., Глухів, 8–10 лют. 2011 р. – Суми : ТД «Папірус», 2012. – С. 161–167.

11. Березовський Ю. В. Оцінка вимог споживачів щодо споживчих властивостей льоновомісних товарів / Ю. В. Березовський // Якість, стандартизація, сертифікація та метрологія: сучасний стан і перспективи розвитку : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 10–12 вересня 2014 р., ХНТУ. – Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2014. – С. 73–75.

12. Березовський Ю. В. Оцінка передумов розвитку ринку товарів з льону в Україні / Ю. В. Березовський // Товарознавчий вісник. – 2014. – Вип. 7. – С. 19–27.

13. Пушкар Г. О. Оцінка ролі забарвлень інтер'єрного текстилю у формуванні його естетичних властивостей і довговічності / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак // Вісник Київського національного університету технологій і дизайну. – 2009. – № 5(39). – С. 118–124.

14. Лен в интерьере: органичность, естественность, экологичность [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.domechti.ru/len-v-interere/18745>.

15. Janet Bealer Rodie. Flax Unshackled. Janet Bealer Rodie. Textile World. May/June. 2011. *The access mode is to the magazine*

16. Кабанець В. М. Галузі льонарства та коноплярства України: стан та перспективи / В. М. Кабанець // Збірник наукових праць Інституту луб'яних культур УААН. – Суми : ВАТ «СОД», 2009. – Вип.5. – С. 3–7.

17. Липчук В. Розвиток льонарства в Україні / В. Липчук, О. Домінська // Аграрна економіка. – 2013. – Т. 6. – № 1-2.

18. Інноваційні технології одержання нетканих та целюлозовмісних матеріалів з льону олійного : монографія / Л. А. Чурсіна, Г. А. Тіхосова, Т. М. Головенко, І. О. Меньяло-Басиста ; під ред. Л. А. Чурсіної. – Херсон : Грінв Д.С., 2014. – 304 с.

19. Киселев М. В. Совершенствование методик прогнозирования качества льносырья и изделий из льна / В. М. Киселев, В. В. Лапшин, Н. А. Смирнова // Сучасні технології в легкій промисловості та сервісі : зб. тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конф. за участю іноземних вчених, 18-19 трав. 2011 р. / відп. ред. С. А. Карван, О. А. Параска. – Хмельницький : Вид-во «ФОП. Параска», 2011. – С. 45–46.

20. Березовський Ю. Екологічно безпечні текстильні товари на основі лляних волокон / Ю. Березовський // Товари і ринки. – 2013. – № 2. – С. 176–183.

21. Виноградова Н. А. Исследование свойств лляных тканей / Н. А. Виноградова, Ю. С. Шустов, С. В. Плеханова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 1 (343). – С. 24–26.

22. Осипенко Н. Н. Разработка типологии потребителей мебельно-декоративных тканей / Н. Н. Осипенко, Д. В. Колчева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 2 (344). – С. 35–39.

23. Малякко Е. Н. Исследование гигроскопических свойств мебельных тканей после истирания / Е. Н. Малякко, А. В. Курденкова, Ю. С. Шустов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 4(346). – С. 11–13.

24. Михайлова Г. М. Експортно-імпортний потенціал України щодо постільних речей / Г. М. Михайлова, Г. Ф. Пугачевський // Легка промисловість. – 2013. – № 2. – С. 59–60.

25. Головенко Т. М. Щодо питань оцінки якості нетканих матеріалів з льону олійного / Т. М. Головенко, Л. Г. Бартків // Якість, стандартизація, сертифікація та метрологія: сучасний стан і перспективи розвитку : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 10–12 вересня 2014 р., ХНТУ. – Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2014 – С. 91–93.

26. Пушкар Г. О. Забезпечення екологічної безпечності килимових покривів для підлоги та стін / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак // Проблеми легкой и текстильной промышленности Украины. – 2012. – № 2 (20). – С. 59–64.

27. Пушкар Г. О. Роль луб'яних волокон в екологізації асортименту інтер'єрного текстилю / Г. О. Пушкар, Б. Д. Семак // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми легкої і текстильної промисловості України», 22–24 жовтня 2014 р. – Херсон : Видавництво ХНТУ, 2014. – С. 51–53.

#### References

1. Pushkar H. O. Inter'yernyy tekstyl': tovaroznavchi aspekty formuvannya asortymentu ta yakosti : monohrafiya / H. O. Pushkar. – L'viv : «Mahnoliya 2006», 2013. – 176 p.

2. Kuz'mina T. O. Yakist' i standartyzatsiya modyfikovanykh llyanykh volokon : monohrafiya / T. O. Kuz'mina, L. A. Chursina, H. A. Tikhosova; [pid red. L. A. Chursinoyi]. – Kherson : Oldi-plyus, 2009. – 416 p.

3. Halyk I. S. Problemy formuvannya ta otsynuyannya ekolohichnoyi bezpechnosti tekstylyu : monohrafiya / I. S. Halyk, B. D. Semak. – L'viv : Vydavnytstvo L'vivs'koyi komertsiynoi akademiyi, 2014. – 488 p.
4. Zhivetin V. V. Len i ego kompleksnoe ispolzovanie / V. V. Zhivetin, L. N. Ginzburg, O. M. Olshanskaya. Monografiya. – M. : Inform – Znanie, 2002. – 400 p.
5. Pushkar H. O. Postil'na ekobilyzna: suchasnyy asortyment ta vlastyivosti / H. O. Pushkar, B. D. Semak / Materialy I-oyi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi «Aktual'ni problemy teorii i praktyky ekspertyzy tovariv», 18-20 bereznya 2014r. – Poltava : Poltavskyy universytet ekonomiky i torhivli, 2014. – pp. 74-77.
6. Pushkar H. O. Shlyakhy optymizatsiyi asortymentu ta pidvyshchennya ekolohichnoyi bezpechnosti inter'yernykh tkanyn dlya postil'noyi i stolovoyi bilyzny / H. O. Pushkar, B. D. Semak // Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu tekhnolohiyi i dyzaynu. – 2010. – No1 (51). – pp.140-146.
7. Pushkar H. O. Vykorystannya llyanoho volokna dlya formuvannya asortymentu inter'yernoho tekstylyu / H. O. Pushkar, B. D. Semak // Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu tekhnolohiyi i dyzaynu. – 2012. – No 2 (64). – pp. 91 – 97.
8. Grischenkova V. A. Assortimentnyy sdvig v primeneniі grubogo korotkogo llyanoho volokna [Elektronniy resurs] / V. A. Grischenkova, T. N. Kudryavtseva, E. I. Shapovalova // Ryinok legkoy promyishlennosti. – 2006. – No 47. – Rezhim dostupu do zhurnal: <http://rustm.net/catalog/article/227.html>
9. Koropchenko S. P. Perspektyvnyy napryamok pererobky lub'yanykh kul'tur / S. P. Koropchenko // Problemy legkoy i tekstilnoy promyishlennosti Ukrainy. – 2009. – No 1. – pp. 72 –75.
10. Kuz'mina T. O. Formuvannya konkurentospromozhnoho asortymentu l'onovnisnykh vyrobiv / T. O. Kuz'mina // Shlyakhy vidrodzhennya haluzey l'onarstva i konoplyarstva ta pidvyshchennya efektyvnosti yikh naukovoho zabezpechennya : zb. nauk. pr.; mizhnar. nauk. - prak. konf., Hlukhiv, 8 – 10 lyut. 2011r. – Sumy : TD «Papirus», 2012. – pp. 161-167.
11. Berezovs'kyy Yu. V. Otsinka vymoh spozhyvachiv shchodo spozhyvchyykh vlastyvostey l'onovnisnykh tovariv / Yu. V. Berezovs'kyy // Yakist', standartyzatsiya, sertyfikatsiya ta metrolohiya : suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku : materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, 10-12 veresnya 2014r., KhNTU. – Kherson : PP Vyshemyrs'kyy V. S., 2014 – pp. – 73-75.
12. Berezovs'kyy Yu. V. Otsinka peredumov rozvytku rynku tovariv z l'onu v Ukraini / Yu. V. Berezovs'kyy // Tovaroznavchyy visnyk. – 2014. – Vyp. 7. – S. 19-27.
13. Pushkar H.O. Otsinka roli zabarvlen' inter'yernoho tekstylyu u formuvanni yoho estetychnykh vlastyvostey i dovhovichnosti / H. O. Pushkar, B. D. Semak // Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu tekhnolohiyi i dyzaynu. – 2009. – No 5(39). – pp.118–124.
14. Len v interere: organichnost, estestvennost, ekologichnost [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.domechti.ru/len-v-interere/18745>.
15. Janet Bealer Rodie. Flax Unshackled [Electronic resource] / Janet Bealer Rodie // Textile World. – May/June. – 2011. – *The access mode is to the magazine* [http://www.textileworld.com/Issues/2011/May-June/Quality\\_Fabric\\_Of\\_The\\_Month/Flax\\_Unshackled](http://www.textileworld.com/Issues/2011/May-June/Quality_Fabric_Of_The_Month/Flax_Unshackled).
16. Kabanets' V. M. Haluzi l'onarstva ta konoplyarstva Ukrainy : stan ta perspektyvy / V. M. Kabanets' // Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu lub'yanykh kul'tur UAAN. – Vyp.5. – Sumy : VAT «SOD», 2009. – pp. 3-7.
17. Lypchuk V. Rozvytok l'onarstva v Ukraini [Elektronniy resurs] / V. Lypchuk, O. Domins'ka // Ahrarna ekonomika. – 2013. – T. 6. – No 1-2. – Rezhim dostupu do zhurnal: <http://irbis-nbuv.gov.ua>.
18. Chursina L. A. Innovatsiyni tekhnolohiyi oderzhannya netkanykh ta tselyulozovnisnykh materialiv z l'onu oliynoho: monohrafiya / L. A. Chursina, H. A. Tikhosova, T. M. Holovenko, I.O. Myenyaylo-Basysta; pid red. L.A. Chursinoyi. – Kherson : Hrin' D.S., 2014. – 304 p.
19. Kiselev M. V. Sovershenstvovanie metodik prognozirovaniya kachestva lonosiyirya i izdeliy iz lna / V. M. Kiselev, V. V. Lapshin, N. A. Smirnova / Suchasni tehnologii v legkoy promyishlovosti ta servisi :zb. tez dopovidney vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi za uchastyu inozemnih vchenih, 18-19 trav.2011r./ vldp. red. S. A. Karvan, O. A. Paraska. – Hmel'niyskiy: vid. «FOP. Paraska». – 2011. – pp. 45-46.
20. Berezovs'kyy Yu. Ekolohichno bezpechni tekstyl'ni tovary na osnovi llyanykh volokon / Yu. Berezovs'kyy // Tovary i rynky. – 2013. – No 2. – pp. 176-183.
21. Vinogradova N. A. Issledovanie svoystv llyanykh tkaney / N. A. Vinogradova, Yu. S. Shustov, S. V. Plehanova // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyishlennosti. – 2013. – No 1 (343). – pp. 24-26.
22. Osipenko N. N. Razrabotka tipologii potrebiteley mebelno-dekorativnykh tkaney / N. N. Osipenko, D. V. Kolcheva // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyishlennosti. – 2013. – No 2 (344). – pp. 35-39.
23. Malyavko E. N. Issledovanie gigroskopicheskikh svoystv mebelnykh tkaney posle istiraniya / E. N. Malyavko, A. V. Kurdenkova, Yu. S. Shustov // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyishlennosti. – 2013. – No 4(346). – pp. 11-13.
24. Mykhaylova H. M. Eksportno-importnyy potentsial Ukrainy shchodo postil'nykh rechey/ H. M. Mykhaylova, H. F. Puhachevs'kyy // Lehka promyslovist'. – 2013. – No 2. – pp. 59-60.
25. Holovenko T. M. Shchodo pytan' otsinky yakosti netkanykh materialiv z l'onu oliynoho / T. M. Holovenko, L. H. Bartkiv // Yakist', standartyzatsiya, sertyfikatsiya ta metrolohiya : suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku : materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, 10-12 veresnya 2014r., KhNTU. – Kherson : PP Vyshemyrs'kyy V. S., 2014 – pp. 91-93.
26. Pushkar H. O. Zabezpechennya ekolohichnoyi bezpechnosti kylymovykh pokryviv dlya pidlohy ta stin / H. O. Pushkar, B. D. Semak // Problemy legkoy i tekstilnoy promyishlennosti Ukrainy. – 2012. – No 2 (20). – pp. 59-64.
27. Pushkar H. O. Rol' lub'yanykh volokon v ekolohizatsiyi asortymentu inter'yernoho tekstylyu / H. O. Pushkar, B. D. Semak / Tezy dopovidney vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy lehkoy i tekstyl'noyi promyishlovosti Ukrainy», 22-24 zhovtnya 2014 r. – Kherson : Vydavnytstvo KhNTU, 2014. – pp. 51-53.

Рецензія/Peer review : 7.1.2015 р. Надрукована/Printed :26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.

УДК 004.89:614.841.4

О.М. МИРОШНИК

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля, г. Черкассы

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА EVOMAX В ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ХИМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

*В статье рассмотрена задача прогнозирования последствий химической аварии, в частности определение уровня концентрации и зоны заражения опасным химическим веществом в послеаварийный период. Для минимизации погрешности полученных результатов информационно-аналитических систем прогнозирования последствий химических аварий предложено использовать модифицированный метод EvoMax. Освещены результаты экспериментов и сделаны выводы относительно перспективных путей дальнейших исследований.*

*Ключевые слова:* химическая авария, концентрация, нечеткая нейросеть, прогнозирование.

O.M. MIROSHNIK

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes

### USING A MODIFIED METHOD OF EVOMAX IN INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEMS OF FORECASTING OF CONSEQUENCES OF CHEMICAL ACCIDENTS

*Abstract - The article considers the problem of forecasting the consequences of chemical accidents, in particular the determination of the level of concentration and zone of contamination hazardous chemical in the post-accident period. To minimize the error of the results, information-analytical systems of forecasting of consequences of chemical accidents, it is proposed to use the modified method EvoMax. The basis of a modified method based on the idea of optimizing the process of random search of the optimal solution using evolutionary algorithms. Using the proposed method allowed us to obtain the predicted values with an average relative deviation of 2.2 to 6.3%, which is significantly better result in comparison with methods that today are used to identify areas of contamination. The proposed technology can be used to Refine the initial values of the parameters of accidents that allows you to improve and to objectify the decision making process. According to a study conclusions and identifies promising path for further research.*

*Keyword:* chemical accident, concentration, fuzzy neural network, prediction.

#### Введение

Последние десятилетия наряду с развитием информационных технологий отмечены и динамикой роста энергетики, металлургической и химической промышленности, сельского хозяйства. Усилилась техногенная нагрузка на окружающую среду. В первую очередь здесь следует отметить производителей и потребителей химической продукции. Возрастание объемов производства, конкуренция и, как следствие, уменьшение нормы прибыли, изношенность основных фондов и отставание инвестиционных вливаний от темпов их амортизации является причиной химических аварий и катастроф. Поэтому важной задачей является минимизация негативных их последствий, к которым, в первую очередь относятся человеческие жертвы, экологические катастрофы и материальный ущерб. Ее решение зависит от качества принимаемых решений как до аварии, так и после нее. Информационной основой при этом служат данные о параметрах аварии, концентрации опасного химического вещества (ОХВ) и ее динамике в зоне заражения. Такая информация позволяет в доаварийный период осуществлять прогнозирование и выполнять сценарный анализ, а в послеаварийный – своевременно эвакуировать людей и проводить соответствующие мероприятия.

Поскольку для химических аварий натурный эксперимент невозможен и они происходят неожиданно в силу стечения обстоятельств, то важную роль играет моделирование. Моделирование позволяет получить априорную информацию о возможном протекании и характере аварии, о ее параметрах, о возможных последствиях. Результаты моделирования не носят абсолютный характер, поскольку любая реальная химическая авария будет отличаться от ее моделируемого аналога. Вместе с тем, информация, полученная в результате моделирования, является основой для прогнозирования, определения возможного количества жертв и материального ущерба, базисом процессов принятия решений.

#### Экспериментальная часть

Главной задачей моделирования является определение концентрации ОХВ как зависимости от параметров аварии, координат точки местности, времени, прошедшего после аварии, и построение соответствующих полей концентрации. Такая задача решается в доаварийный и послеаварийный периоды. Что является исходными данными для моделирования? В большинстве случаев концентрация рассчитывается на основании известных методик. Но полученные результаты имеют низкую точность, поскольку общие методики ориентированы на идеальные условия протекания аварий. Сложно и даже невозможно учесть особенности застройки местности и ее рельефа.

На сегодняшний день наиболее часто применяют три подхода [1, 2] к определению концентрации ОХВ, базирующиеся на использовании:

- гауссовских или дисперсионных моделей;
- моделей рассеяния, в которых используются интегральные законы сохранения в облаке в целом при залповом выбросе, сюда же включаются модели «тяжелого газа»;

- моделей прямого численного моделирования.

Каждая из указанных моделей имеет свои особенности применения, преимущества и недостатки. В частности, гауссовские модели базируются на эвристиках, заключающихся в определении коэффициентов, характеризующих атмосферную турбулентность. В то же время поведение ОХВ при выбросах, в особенности возле места выброса, значительно сложнее, чем можно описать моделями такого типа. Здесь не учитываются наведенные течения и высокая плотность вещества. За рубежом были разработаны специальные модели, в которых учитывались соответствующие особенности ОХВ ("тяжелый газ") и названы моделями рассеяния "тяжелого газа". Известны реализации таких моделей: методика Всемирного банка [3], HGGYSTEM [4], предложенные в ГОСТ Р12.3.047-98 [5], методика РД 52.04.253-90 [6]. Общим недостатком таких методов являются завышенные реальные последствия аварий.

Еще одним недостатком указанных моделей является их теоретический характер и низкая практическая применимость, поскольку они ориентированы на использование в послеаварийный период и носят общий характер. В то же время каждая химическая авария имеет специфические особенности и определение полей концентрации ОХВ с использованием указанных моделей вследствие большого объема вычислений и необходимости задания коэффициентов и параметров аварии в критических условиях является почти невыполнимой задачей.

Одним из способов решения указанной проблемы является использование экспертных заключений, базирующихся на опыте, интуиции, знаниях, результатов использования известных методик, применения программных продуктов для моделирования последствий аварий, а также климатических особенностей и особенностей местности. В таком случае необходимо определить максимально возможную зону заражения, реперные (наиболее типичные, характерные для значительных площадей) точки концентрации, наиболее возможные параметры возможных аварий и сформировать таблицу исходных данных, содержащую кортежи такого типа:

$$BD_1 = \langle x_0, y_0, z_0, t_0, V, v, u, S \rangle, \quad BD_2 = \langle x, y, z, t, C \rangle, \quad (1)$$

где  $(x_0, y_0, z_0)$  – координата точки аварии,  $t_0$  – время возникновения аварии,  $V$  – общий объем выбросов,  $v$  – объемная скорость выброса,  $u$  – скорость ветра,  $S$  – стабильность атмосферы по Пасквилю,  $(x, y, z)$  – координата точки, в которой в момент времени  $t$  концентрация ОХВ будет равна  $C$ . Таблица, содержащая данные (1), является основанием для получения зависимости

$$C = F(x_0, y_0, z_0, t_0, V, v, u, S, x, y, z, t), \quad (2)$$

с использованием которой можно получить поля концентрации для любой точки зоны заражения в любой момент времени.

Очевидно, что зависимость (2) может быть структурно и параметрически идентифицированной с использованием различных подходов и методов. Наиболее распространенным является применение модели множественной линейной регрессии [7]

$$C = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (3)$$

как решения задачи структурной идентификации и метода наименьших квадратов (МНК) как способа параметрической идентификации. Простота такой модели является ее преимуществом, но важно учитывать, что природные процессы являются существенно нелинейными, и использование модели (3) актуально только на небольших временных или пространственных отрезках. Рациональнее использовать модель нелинейной множественной регрессии [8]

$$C = a \cdot f_1(X_1) \cdot f_2(X_2) \cdot \dots \cdot f_n(X_n), \quad (4)$$

где  $f_i(X_i) = f_i(b_{i0}, b_{i1}, \dots, b_{im_i}, X_i)$  – зависимости, которые могут путем алгебраических преобразований приведены к линейным,  $b_{j0}, b_{j1}, \dots, b_{jm_i}$  – параметры,  $i = \overline{1, n}$ ,  $m_i$  – количество параметров в  $i$ -й зависимости.

Преимуществом такой модели является ее нелинейность, но поскольку вычисление параметров функций осуществляется с помощью МНК, то необходима проверка условий его применения. Кроме того, набор функций является ограниченным, что указывает на недостаток метода.

Одним из наиболее точных методов аппроксимации зависимостей заданных таблично является метод группового учета аргументов (МГУА) [9]. Соответствующей моделью является полином Колмогорова-Габора

$$C = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_i \sum_{j>i} a_{ij} X_i X_j + \dots \quad (5)$$

Метод хорошо работает на «коротких» выборках и ограничивает исследователя только выбором из конечного множества опорных функций. Он достаточно сложен в реализации, требует значительного количества вычислений. Полученный результат очень сложен для интерпретации.

В последнее время для идентификации таблично заданных зависимостей используют искусственные нейронные сети (ИНС) [10]. Следует отметить, что основных нейросетевых архитектур и методов обучения сетей существует несколько десятков. Преимуществом нейросетевой идентификации является почти полное отсутствие требований к исходным данным. Однако, вследствие проблемы попадания в локальные оптимумы, нейросеть в подавляющем большинстве случаев очень сложно правильно обучить, кроме того, результат ее функционирования нельзя интерпретировать.

Рассматривая применение указанных моделей и методов к решению задачи идентификации (2), отметим, что локальные решения с их использованием в условиях ограниченного и конечного множества исходных данных можно получить, но получить поля концентрации невозможно. Такой вывод базируется на неточности экспертных заключений, малом количестве исходных данных и большом количестве параметров, которые необходимо определить.

Исходя из вышеуказанных замечаний и соображений, в качестве модели (2) предложено использовать нечеткую нейросеть как технологию, интегрирующей в себе преимущества нейросети и ее обучения, возможности представления экспертных заключений и их интерпретации. Одной из первых нечетких нейронных сетей предложил Янг (J. – S.R. Jang) в 1993 году [11]. Сеть получила название ANFIS (Adaptive – Network – Based Inference System). Традиционно в такой сети использовался нечеткий логический вывод в форме Сугено. Однако консеквент нечетких продукционных правил в форме Сугено является взвешенной суммой аргументов антецедента, что для нашей задачи является неприемлемым. Поэтому было предложено использовать некоторую модификацию сети ANFIS с выводом в форме Цукамото [8].

Поскольку структура ННС уже определена продукционными правилами, то остается осуществить ее параметрическую идентификацию. Предположим, что все функции принадлежности выбраны однотипно гауссовскими  $\mu(z) = \exp[-(z - a)^2 / 2\sigma^2]$ , где  $a$  и  $\sigma$  – параметры. Тогда количество параметров будет равно произведению количества входных переменных на количество правил, являющихся экспертными заключениями. Если заключения неравнозначны или выполнены разными экспертами, то количество параметров увеличивается, поскольку и значимость правил, и компетентность экспертов являются параметрами.

Для параметрической идентификации выберем эволюционные алгоритмы. Такой выбор обоснован тем, что в этом случае отсутствуют требования к дифференцируемости функций принадлежности и можно избежать проблемы локальных оптимумов. Традиционный эволюционный алгоритм имеет такие шаги:

Шаг 1. В соответствии с требуемой точностью результата определить мощность множества потенциальных решений.

Шаг 2. Определить выборочную популяцию решений и вычислить меру оптимальности каждого решения.

Шаг 3. Пока не выполнено условия останова алгоритма, выполнить:

Шаг 3.1. Выбрать решения из выборочной популяции.

Шаг 3.2. Осуществить кроссовер и отобрать одно из полученных решений.

Шаг 3.3. С определенной вероятностью осуществить мутацию решения.

Шаг 3.4. Записать полученное решение в новую популяцию.

Шаг 3.5. Если новая популяция не сформирована, то повторить шаги 3.1–3.4.

Шаг 4. Конец алгоритма.

Потенциальное решение задачи параметрической идентификации имеет вид:

$$z = (a_1, \sigma_1, a_2, \sigma_2, \dots, a_m, \sigma_m, \xi), \quad (6)$$

где  $m$  – количество параметров функций принадлежности,  $\xi$  – дополнительные параметры.

Значение каждого из параметров принадлежит ограниченной области, определяемой экспертами. Поэтому существует необходимость проверки каждого потенциального решения на его принадлежность к области возможных решений.

Любой из эволюционных алгоритмов, к которым традиционно относят генетические алгоритмы, эволюционные стратегии, генетическое программирование и эволюционное программирование, требует значительных временных затрат для своего выполнения вследствие непродуктивного поиска. Поэтому дальше при решении задачи параметрической идентификации будем базироваться на использовании известного метода EvoMax [12].

В основании метода EvoMax лежит идея оптимизации процесса случайного поиска оптимального решения с использованием эволюционных алгоритмов. Базируется такая идея на реализации направленной оптимизации с использованием композиции нескольких техник, в частности, элементов эволюционных стратегий, метода анализа иерархий и элементов теории нечетких множеств. Рассмотрим модифицированный метод параметрической идентификации концентрации ОХВ на основе EvoMax.

Традиционно метод EvoMax используется для решения задачи поиска

$$\max_{X \in \Omega} f(X), \quad (7)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $\Omega$  – некоторый гиперпараллелепипед.

На макроуровне предлагаемый метод будет иметь такие шаги:

Шаг 1. Номер итерации  $e = 1$ .

Шаг 2. Определим начальное количество потенциальных решений  $\lambda$  и сгенерируем равномерно распределенные в  $\Omega$  потенциальные решения  $z_1^e, z_2^e, \dots, z_\lambda^e$ , каждое из которых имеет вид (6).

Шаг 3. Вычислим значения функции  $f$  в точках  $z_1^e, z_2^e, \dots, z_\lambda^e$ :  $f_1^e = f(z_1^e), f_2^e = f(z_2^e), \dots, f_\lambda^e = f(z_\lambda^e)$ .

Шаг 4. Нормируем значения  $f_j^e$  так, чтобы  $f_j^{ne} \in [0;1]$ ,  $\sum_{i=1}^{\lambda} f_j^{ne} = 1$ .

Шаг 5. Формируем матрицу попарных сравнений Саати  $S$  таким образом. Среди нормированных значений функции находим минимальное  $f_j^{ne}$ , разбиваем отрезок  $[0;1]$  на 10 интервалов:  $[0;0,1), [0,1;0,2), \dots, [0,9;1]$ .

Тогда для всех  $h \in \{1, 2, \dots, \lambda\}$ , если  $f_j^{ne} \in [0,1k;0,1+0,1k)$  и  $f_h^{ne} \in [0,1l;0,1+0,1l)$ , где  $k, l \in \{0, 1, \dots, 9\}$ , то

$$s_{jh} = l - k + 1. \text{ Другие элементы матрицы } S \text{ рассчитываются так: } s_{pq} = \frac{s_{jq}}{s_{jp}}.$$

Шаг 6. Рассчитаем собственные числа матрицы  $S$  и для максимального собственного числа  $a_{\max}$  находим соответствующий собственный вектор  $w$ . Если вектор  $w$  по разным причинам найти проблематично, то его элементы приближенно рассчитывают по формуле  $w_j = \frac{1}{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{\lambda j}}$ . Значения  $w_j$  указывают на

меру оптимальности (квазиоптимальности) потенциального решения  $z_j^e$ .

Шаг 7. Известно [13], что следующим этапом должна быть генерация «потомков» и формирование новой популяции потенциальных решений. Авторы эволюционной стратегии предлагают получать «потомков» таким образом:

$$z_j^{e+1} = z_j^e + \xi(N(0,1)), \quad j = \overline{1, \mu}, \tag{8}$$

где  $\xi(N(0,1))$  – нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и единичной дисперсией,  $\eta$  – количество «потомков» у одного «родителя». По концепции эволюции по Ч. Дарвину  $\mu > 1$ , а в [15] рекомендовано выбирать  $\mu \geq 7\lambda$ . Последнее неравенство является малодоказательным.

Мы считаем, что для эффективного поиска оптимального решения необходимо учитывать меру оптимальности  $w_j$  потенциальных решений  $z_j^e$ . Это позволит только детальнее исследовать область  $\Omega$ .

При этом возникает две гипотезы:

- чем большим является значение  $w_j$ , тем большим должно быть значение  $\sigma_j$  при генерации «потомков» потенциального решения  $z_j^e$ :

$$z_j^{e+1} = z_j^e + \xi(N(0, \sigma_j^e)), \tag{9}$$

что позволит расширить область поиска в окрестности лучшего решения, а в области наименее потенциально оптимального решения область будет максимально суженой, в т.ч. и из-за неперспективности ее исследования;

- наоборот, большее значение  $w_j$  является причиной глубокого исследования окрестности наиболее перспективного решения, а большее значения позволит детально исследовать область, отдаленную от неперспективного потенциального решения.

Такие две гипотезы требуют подтверждения, обе они являются эвристическими, но не противоречат теории и практике стохастической оптимизации. Мы склоняемся к правильности второй гипотезы, что подтверждается первыми экспериментами, но необходимы и более глубокие исследования.

Еще одной задачей есть определение оптимального количества потомков в зависимости от оптимальности решения. Очевидно, что такое количество  $N(z_j^e)$  зависит от меры области  $\Omega$  и заданной точности потенциального решения  $\varepsilon$ . Для случая, когда  $\Omega$  является отрезком  $N(z_j^e) = g(L([a, b]))$ , где  $L(*)$  есть длиной. Определение величины  $\mu_j$  также является эвристическим. На первом этапе рационально считать, что  $\mu_j = \mu \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, \lambda\}$ . Такой вывод базируется на том, что, взяв за основу вторую гипотезу, для перспективного решения необходимо более глубокое исследование окрестности, а для неперспективного – более широкое. И то, и другое являются одинаково важным.

Наиболее сложной есть задача определения значения дисперсии для каждого отдельного решения. Очевидно, что  $\sigma_j^2$  будет зависеть, как и в предыдущем случае, от  $L([a, b])$  и  $\varepsilon$ , а также от расстояния к ближайшим соседям-решениям. Находим  $d(z_j^e, z_L)$ ,  $d(z_j^e, z_R)$  (расстояние к ближайшим левому (или точке  $a$ ) и правому (или точке  $b$ ) «соседей»-решений). Пусть  $d_{\max} = \max\{d(z_j^e, z_L), d(z_j^e, z_R)\}$ , тогда  $\sigma_j = \frac{1}{3} d_{\max}$ ,

поскольку по известному правилу 3-х сигма именно 9973 точек из 10000 при генерации по формуле (8) будут принадлежать интервалу  $(x_j^e - 3\sigma_j, x_j^e + 3\sigma_j)$ .

Шаг 8. На предыдущем шаге выполнено генерацию  $\lambda \cdot \mu$  потенциальных решений. Находим соответствующие значения функции  $f$ . По этим значениям, а также по значениям  $f_1^e, f_2^e, \dots, f_\lambda^e$  определяем  $\lambda$  лучших решений  $z_1^{e+1}, z_2^{e+1}, \dots, z_\lambda^{e+1}$  и переходим на шаг 1.

Поиск оптимального решения заканчивается на  $e$ -й итерации тогда, когда на шаге 2  $\max_{i,j} |f_i - f_j|$ ,  $i, j = \overline{1, \lambda}$  будет меньше некоторого наперед заданного  $\delta > 0$ , так, что и  $\max_{i,j} |z_j^e - z_i^e| < \varepsilon$ , что свидетельствует о сходимости метода. Тогда, то решение  $z_i^v$ , которое будет соответствовать значению  $f_i^e = \max_j f_j^e$ , и будет решением поставленной задачи.

Для задачи параметрической идентификации модели концентрации ОХВ функции  $f_j$  будут такими:

$$f_j = \sum_{k=1}^p (C_k - F(z_j, x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}, t_{0k}, V_k, v_k, u_k, S_k, x_k, y_k, z_k, t_k))^2, \quad j = \overline{1, \lambda},$$

а задача (7) трансформируется в задачу поиска

$$\min_e \max_{i,j} |f_i - f_j|, \quad i, j = \overline{1, \lambda}.$$

Таким образом, для структурной идентификации модели концентрации ОХВ разработана модель в виде нейро-нечеткой сети логическим выводом в форму Цукамото, для ее параметрической идентификации предложено использовать модифицированный метод направленной оптимизации EvoMax.

Как упоминалось выше, физический эксперимент для задачи невозможен, поэтому мы использовали результаты экспериментов на Торней-Айлэнд. В этих экспериментах воспроизводились залповые выбросы (опыты 07, 05, 08, 17) и длительные выбросы (опыт 45) фреон-азотных смесей в открытом пространстве. Последний происходил при таких исходных данных: объем эмиссии 2000 м<sup>3</sup>, доля в газообразной смеси фреона 31%, скорость ветра 2 м / с, стабильность атмосферных по Pasquill E/F. В залповых выбросах объем газа был 2000 м<sup>3</sup>, часть фреона в газообразной смеси составила 24%, скорость ветра – 3,4 м / с, стабильность атмосферы Pasquill – E. Эти данные сравнивали с прогнозными значениями, рассчитанными для различных методик.

Для прогнозирования модифицированным методом EvoMaxM использованы экспертные заключения, приведенные в таблице типа (1), имеющей 54 строки. Семь строк этой таблицы использовались для контрольной выборки. Согласно 47 заключениям построена нейро-нечеткая сеть и реализована ее параметрическая оптимизация. Далее мы рассчитали значения концентрации в точках на оси по направлению ветра на различных расстояниях от точки аварии. Полученные значения и результаты других методов экспериментов для опыта 17 показаны в таблице 1 и на рис. 1. Сравнение результатов осуществлено по критерию среднего относительного отклонения.

Таблица 1

**Опыт 17. Реальные и прогнозируемые значения для концентрации ОХВ**

X, м	40	50	70	100	140	220	500	Отклонение, %
C, % (об)	12,1	8,4	4,7	3,1	1,35	0,6	0,32	
Phast	11,2	9,5	7,5	4,2	2,4	0,95	0,18	23,43
Toxi3	11	9,5	7,6	5,7	4,3	2,5	0,6	238,2
Hgsystem	3,8	3,1	2,2	1,5	1	0,5	0,2	23,62
EvoMaxM	12,2	7,9	4,1	2,5	1,4	0,72	0,21	4,24

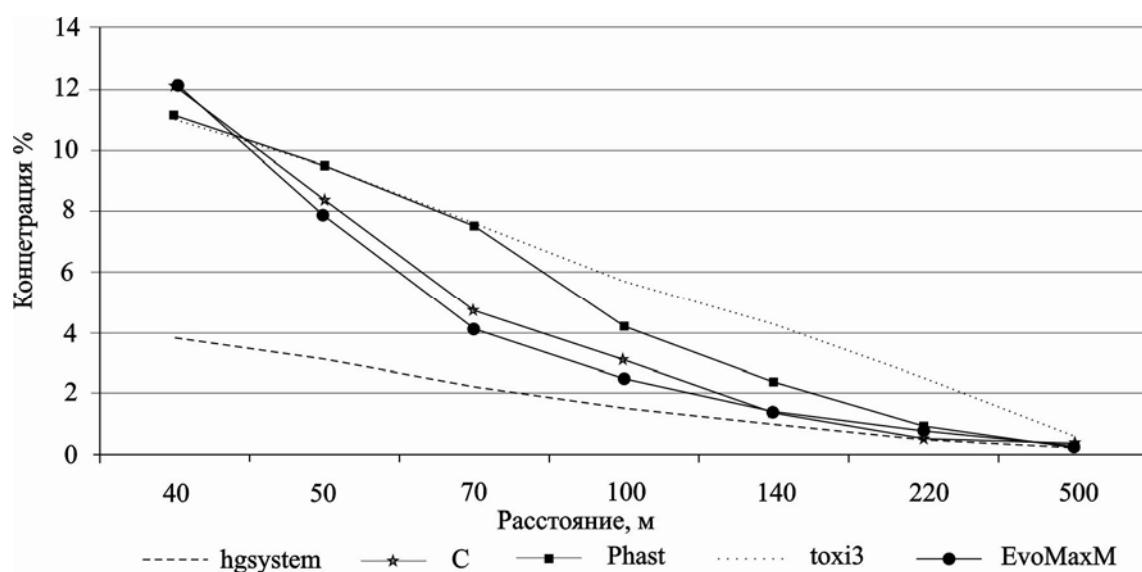


Рис. 1. Фактические и прогнозируемые данные концентрации ОХВ

Прогнозирование и сравнительный анализ были проведены также и для других опытов. Применение EvoMaxM позволило получить прогнозные значения с средним относительным отклонением в пределах 2,2–

6,3%, что было значительно лучшим результатом по сравнению с результатами других методов.

### Выводы

В данной работе предложен метод определения концентрации ОХВ в доаварийный период. Он основан на использовании нейронечеткой сети в качестве модели, которая позволяет осуществлять обработку экспертных заключений и проведение дальнейшей обработки и интерпретации результатов. Оптимизация параметров сети осуществлена на использовании направленной оптимизации EvoMax, как технологии ускоренного поиска приемлемых или квази-оптимальных значений.

Предлагаемая технология может быть использована в послеаварийный период для уточнения полей концентрации ОХВ. Учитывая данные измерений концентрации ОХВ приборами, нейронечеткая сеть может быть переобучена в кратчайшие сроки и использована для решения задачи прогнозирования концентрации ОХВ во всех возможных точках зоны заражения. Кроме того, эта технология может быть использована для уточнения начальных значений параметров аварии, что позволит улучшить и объективизировать процесс принятия решений.

### Литература

1. Makhviladze G.M., Yakush S.E. Large-scale unconfined fires and explosions. Proc. of the Compustion Institute. 2002. Vol. 29. P. 195–210.
2. Шаталов А.А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46–51.
3. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual). World Bank Tech. Paper 55, 1988.
4. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Hague, 1994.
5. ГОСТ Р12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
6. Руководящий документ. «Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» (РД 52.04.253-90). Штаб Гражданской обороны СССР, Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. JT.: Гидрометеиздат, 1991.
7. Грубер И. Эконометрия. Введение в эконометрию / И. Грубер. – К.: Астарт, 1996. – Т. 1. – 434 с.
8. Снитюк В.Е. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы / Снитюк В.Е. – К.: Маклаут, 2008. – 364 с.
9. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
11. Jang J.-S. R. ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, May-June 1993. P. 665–685.
12. Снитюк В.С. Спрямована оптимізація і особливості еволюційної генерації потенційних розв'язків / В.С. Снитюк // Теорія прийняття рішень : матеріали V Міжн. школи-семінару, Ужгород (1–6 жовтня 2012). – С. 182–183.
13. Rechenberg I. Evolutionsstrategie «94». Stuttgart-Bad Gannstatt: Frommann Halzboog, 1994. 434 p.

### References

1. Makhviladze G.M., Yakush S.E. Large-scale unconfined fires and explosions // Proc. of the Compustion Institute. – 2002. – Vol. 29. – P. 195-210.
2. The method of calculating the distribution of accidental emissions, based on the model of the heavy gas dispersion // A. A. Shatalov, M. C. Lizunov, A. S. pechurkin etc. / safety in the industry. - 2004. No. 9. - S. 46-51.
3. Guidelines for assessing industrial hazards(Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual). World Bank Tech. Paper 55, 1988.
4. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Hague, 1994.
5. GOST P12.3.047-98 SSBT. Fire safety of technological processes. General requirements. Control methods.
6. Guidance document. "Methods for the prediction of the extent of infection of highly toxic substances in case of accidents (destruction) on chemically dangerous objects and transport" (RD 52.04.253-90). The staff of the Civil defense of the USSR Committee for Hydrometeorology under the Cabinet of Ministers of the USSR. JT.: Gidrometeoizdat, 1991.
7. Gruber, I. Econometrics. Introduction to econometrics / I. Gruber. - K.: Astarte, 1996. - T. 1. - 434 S.
8. Snytyuk V. E. Forecasting. Models, methods, algorithms. - K.: Mclaut, 2008. - 364 S.
9. Ivakhnenko A. G., Yurachkovsky Y. P. Modeling of complex systems from experimental data. - M.: Radio and communication, 1987. - 120 C.
10. The Haykin S. Neural networks: a comprehensive course / S. Haykin. The M: Williams, 2006. the 1104 S.
11. Jang J.-S. R. ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, May-June 1993. – P. 665-685.
12. Snytyuk V.E. Century that is Directed optimization and the features of the evolutionary generation of potential solutions / decision Theory" proceedings of the V international. school-seminar, Uzhgorod (October 1-6, 2012). - S. 182-183.
13. Rechenberg I. Evolutionsstrategie «94». – Stuttgart-Bad Gannstatt: Frommann Halzboog, 1994.– 434 p.

Рецензія/Peer review : 4.2.2015 р. Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Жартовский В.М.



## ВПЛИВ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ НА ЗМІНУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ДЕФЕКТНІСТЬ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

*Проведено вивчення впливу водопровідної води на зміну властивостей та дефектність поліетиленових труб протягом довготривалої експлуатації. Електронно-мікроскопічними дослідженнями виявлені зміни морфології поверхонь зовнішньої та внутрішньої стінок водопровідних труб, що перебували в експлуатації протягом шести років. За допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії проведено дослідження осаду та сольових відкладень на внутрішніх стінках труб. Розглянуто питання впливу якості водопровідної води та води із свердловини на структуру та дефектність полімерних водопровідних виробів.*

*Ключові слова: поліетиленові труби, дефектність, структура, водопровідна вода.*

N.I. DOMANTSEVICH, O.V. SHUNKINA, B.P. YATSYSHYN

Lviv Academy of Commerce

### INFLUENCE OF TAPWATER ON PROPERTIES CHANGE AND INHERENT FLAW OF POLYETHYLENE PIPES

*Abstract - Research Aim is to define the degree of influence of tapwater on the change of properties and inherent flaw of polyethylene pipes, during their long exploitation.*

*The morphology changes of surfaces on external and internal walls of water-pipes which were in exploitation during six years have been noticed by electronic-microscopic researches. The research of sediment and salt sedimentations on the midwalls of pipes has been conducted by means of the energy dispersible x-rayed spectroscopy. The question of quality influence of running water and water from a mining hole on a structure and inherent flow of polymeric tapwater pipes was analyzed.*

*The influence of tapwater on the properties change and inherent flaw of polyethylene pipes during their long exploitation has been demonstrated by means of electronic-microscopic researches.*

*Keywords: polyethylene pipes, inherent flaw, structure, tapwater*

#### Вступ

Однотимчасний вплив багатьох факторів, що діють на полімерний трубопровід протягом усього терміну експлуатації, може призвести до зміни фізико-механічних властивостей та викликати активну деструкцію матеріалу. Визначення ступеня впливу комплексу чинників (сонячна радіація, атмосферостійкість, зовнішнє агресивне середовище, показники якості води, величина внутрішньотрубного тиску тощо), які змінюють терміни експлуатації та погіршують якість вихідних матеріалів, є першочерговим завданням у визначенні споживних властивостей матеріалів.

Одним із напрямків досліджень, що стосуються змін експлуатаційних властивостей поліетиленових трубопроводів є вивчення впливу води, яка збагачена дезінфікуючими засобами. Ця проблема порушується у великому обсязі науково-технічної літератури, починаючи із вісімдесятих років двадцятого століття. Результати досліджень впливу води з дезінфікуючими засобами на поліетиленові водопровідні вироби незначно відрізняються, що зумовлено використанням різних методик експериментів та застосуванням води з різними фізичними, хімічними та біологічними показниками. Найбільш частими експлуатаційними вадами, що спричиняють передчасний вихід з ладу поліетиленових труб були дефекти, пов'язані із утворенням тріщин на внутрішніх стінках водопровідних труб, які використовувались у мережах із носієм, де як дезінфікуючий засіб використовувався діоксид хлору. Аналогічні результати отримані при дослідженнях водопровідних полімерних виробів, що використовувались у мережах, де дезінфікуючим компонентом були хлор, хлораміни, гіпохлорит натрію, які приводять до кисневої деструкції, зниження його молярної маси, крихкості матеріалу та активного дефектоутворення по поверхні внутрішніх стінок труб [1–7].

Метою даного дослідження було визначення впливу водопровідної води на споживні властивості та якість поліетиленових труб, які були задіяні в системі водопостачання КП "Пустомитиводоканал" (Україна, Львівська область).

Об'єктом дослідження – труби із поліетилену ПЕ80 (з модифікуючими додатками), що перебували в експлуатації протягом шести років у системі водопостачання холодної води.

#### Експериментальна частина

Дослідження поверхні зразків проводилися на скануючому електронному мікроскопі EVO-40XVP з високою роздільною здатністю. Для забезпечення контрастності зразки підлягали попередній іонній очистці на приладі ВУП-4, де проводилося напилення алюмінію для забезпечення стоку зарядів.

Експлуатація протягом року значно не вплинула на полімерну трубу, однак, виявлено початкові зміни структури поверхні, а саме: зростання кристалічності зразка та збільшення кількості дефектів. Дефектність структури поверхні проявляється у збільшенні ширини тріщин, наприклад від 1 мкм до 2 мкм, збільшення пор у діаметрі від 0,5 мкм до 1–1,5 мкм (рис. 1).

У результаті дослідження поліетиленових труб встановлено, що морфологія поверхні зразків, що перебували в експлуатації протягом 6 років, набула більшої рельєфності, тріщини на межі розділу фаз збільшились у розмірах і коагулюються, що особливо помітно при порівнянні структур при малому збільшенні (рис. 1 а, 2 а). При цьому на поверхні спостерігаються напрямки, по яких дані дефекти

концентруються і по лініях яких у наступному зі зростанням механічного навантаження можуть утворюватися розриви та розломи. Одночасно на поверхні з'являються пори, шароподібні утворення термостабілізатора, зростає кількість місць з активним виділенням пігменту (рис. 2, б).

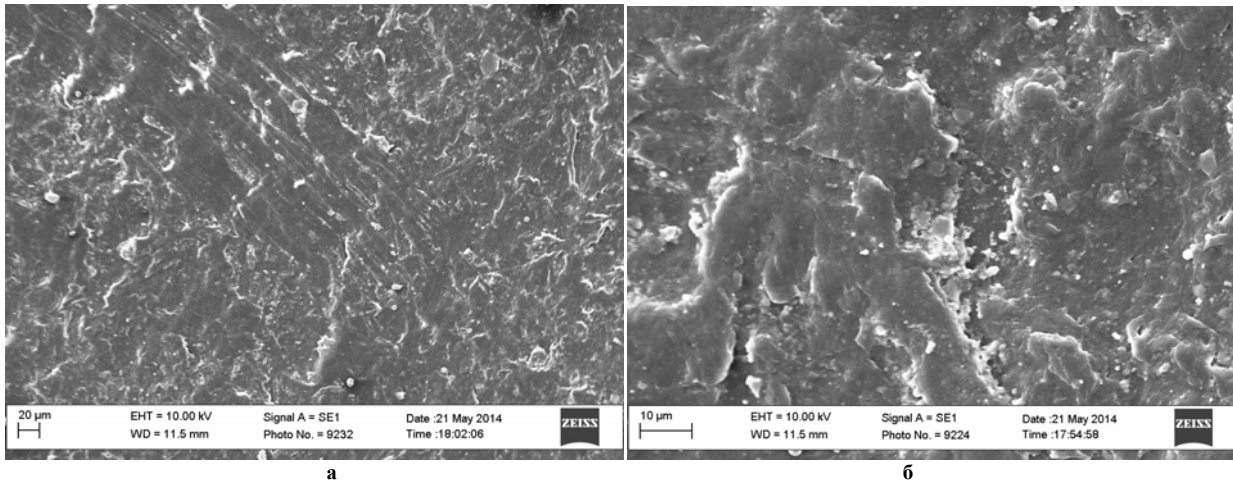


Рис. 1. Структура поверхні поліетиленової труби, що знаходилась в експлуатації протягом 1 року: а – X 200; б – X 1000

Тривала експлуатація поліетиленових труб змінює їхні характеристики. В основному, це пов'язано з часовими змінами структури під дією внутрішніх (додатки, наповнювачі) і зовнішніх (агресивне зовнішньо-і внутрішньотрубне середовище, фотоокислювальна деструкція, розрив полімерних ланок, вимивання додатків, механічне навантаження під час монтажу, тиск води тощо) чинників. Всі ці фактори призводять до збільшення центрів кристалізації, а в подальшому – до загального зростання обсягу кристалічної фази в полімерній матриці. Дане неодмінно спонукає до підвищення дефектності матеріалу через виникнення напружень по лінії розділу кристалічної та аморфної фаз, а також до виникнення порушень росту самих кристалів [8, 9].

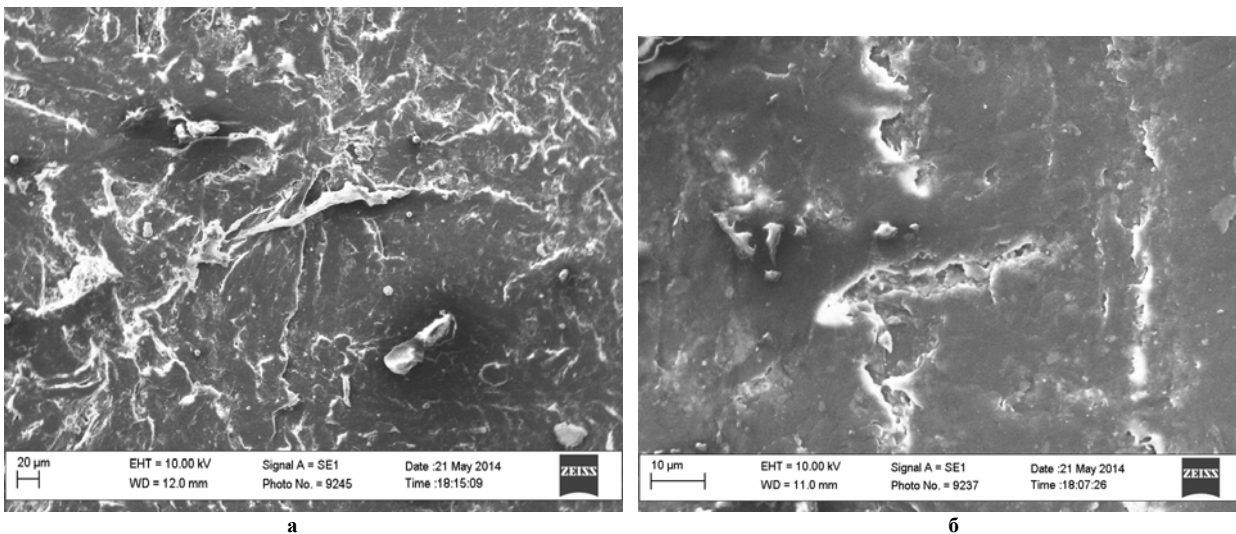


Рис. 2. Структура поверхні поліетиленової труби, що знаходилась в експлуатації протягом 6 років: а – X 200; б – X 1000

Подальша експлуатація при навантаженнях таких труб призведе до утворення більшої кількості дефектів. З часом у місцях контакту аморфної і кристалічної фази, вкраплень пігменту, включень додатків і наповнювачів можуть виникнути дефекти, розміри яких будуть збільшуватись під впливом навантажень або несприятливих умов експлуатації. Тому, введення в полімерну матрицю будь-яких речовин і матеріалів, які знижують ступінь кристалічності, полегшує процес переробки за рахунок збільшення вільного об'єму системи, спричиняє зростання рухливості сегментів полімеру та аморфізацію матриці і, відповідно, сприяє підвищенню механічних характеристик труб.

На внутрішній стінці водопровідних труб, які були в експлуатації протягом 6 років, спостерігається утворення осаду та солевих відкладень. Зондування поверхні зразка дало змогу виявити розбіжності у структурі осаду та солевих відкладень по різних напрямках (рис. 3).

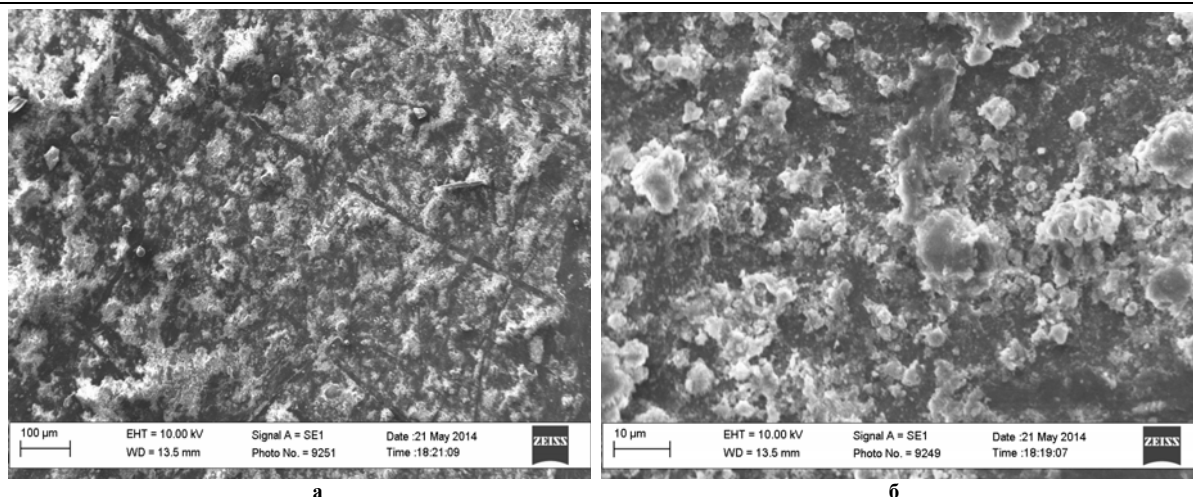


Рис. 3. Осадові формування та сольові відкладення на внутрішній стінці водопровідної поліетиленової труби, яка перебувала в експлуатації протягом 6 років: а – X 100; б – X 1000

Виявлені структуроутворення, без сумніву, зумовлюють вплив на внутрішню поверхню труби під час експлуатації, оскільки щільно заповнюють пори та тріщини поверхні полімерної матриці-основи. Не слід нехтувати даним фактором, який, хоча і не відноситься до агресивного впливу на фізичні та хімічні характеристики виробу, проте може служити стимулятором перетворень в масиві поліетиленового виробу.

Поелементне дослідження осаду та сольових відкладень на внутрішніх стінках труб методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) дозволило визначити якісний склад структури осаду (рис. 4).

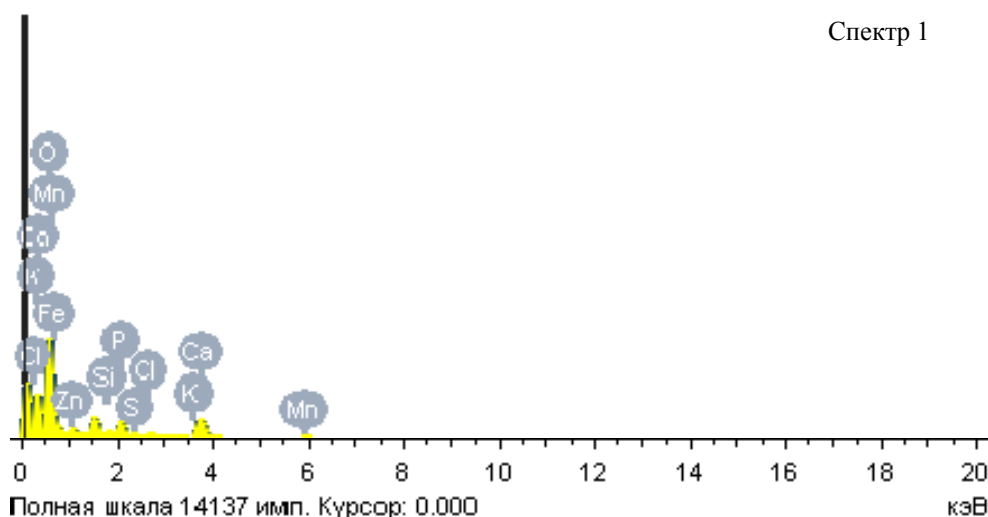


Рис. 4. Рентгенівський характеристичний спектр внутрішньої поверхні поліетиленової труби отриманий за допомогою енергодисперсійного рентгенівського спектрального аналізатора

По отриманих характеристичних спектрах встановлено наявність на поверхні досліджуваного зразка іонів  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $P^{3+}$  в різній концентрації, перелік яких подано у табл. 1.

Таблиця 1

Поелементний склад мінеральних відкладень

Елементи	Ваговий, %	Атомний, %
O	45,01	69,85
Si	1,74	1,54
P	4,64	3,72
K	0,57	0,36
Ca	15,36	9,51
Mn	9,01	4,07
Fe	16,86	7,50
Zn	4,26	1,62
Сума	100,00	-

Основним фактором впливу на утворення осаду та сольових відкладень на стінках труби є фізичні,

хімічні та біологічні показники водопровідної води. Поелементний склад відкладень на внутрішній поверхні поліетиленових труб частково відповідає показникам якості водопровідної води, яка транспортувалась у системі водопостачання. Згідно досліджень хімічних показників води із свердловини “Хоросно”, з якої протягом всього терміну експлуатації трубопроводу постачалась вода, визначено її якісний і кількісний склад (табл. 2).

Таблиця 2

## Показники якості води із свердловини “Хоросно”

№ п/п	Найменування показника	Одиниця виміру	Фактична концентрація
1	Гідрокарбонати	мг/дм <sup>3</sup>	256,2
2	Сульфати	мг/дм <sup>3</sup>	82,6
3	Кальцій	мг/дм <sup>3</sup>	42,08
4	Натрій + Калій	мг/дм <sup>3</sup>	63,25
5	Хлориди	мг/дм <sup>3</sup>	30,6
6	Сухий залишок	мг/дм <sup>3</sup>	492,0
7	Завислі речовини	мг/дм <sup>3</sup>	3,35
8	Азот амонійний	мг/дм <sup>3</sup>	0,02
9	Нітрити	мг/дм <sup>3</sup>	0,0015
10	Нітрати	мг/дм <sup>3</sup>	14,8
11	Фосфати	мг/дм <sup>3</sup>	0,019
12	Окислюваність КМnO <sub>4</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	1,33
13	ХСК	мг/дм <sup>3</sup>	9,09
14	Залізо заг.	мг/дм <sup>3</sup>	0,09
15	Нафтопродукти	мг/дм <sup>3</sup>	0,0
16	Аніонні СПАР	мг/дм <sup>3</sup>	0,0
17	Мідь	мг/дм <sup>3</sup>	0,0031
18	Свинець	мг/дм <sup>3</sup>	0,0159
19	Марганець	мг/дм <sup>3</sup>	0,0532
20	Кобальт	мг/дм <sup>3</sup>	0,011
21	Фтор	мг/дм <sup>3</sup>	0,039
22	Активна реакція рН	-	7,43

Результати дослідження якості води зі свердловини показали значний вміст неорганічних компонентів, таких як марганець, свинець та натрій + калій, що зумовило утворення мінеральних відкладень на внутрішній стінці труби.

Результати дослідження якості водопровідної води за санітарно-мікробіологічними та органолептичними показниками подано у таблиці 3.

Таблиця 3

## Результати дослідження водопровідної води

№ п/п	Найменування показника	Одиниця виміру	Результат дослідження
1	Запах при 20°C	бал	0
2	Запах при 60°C	бал	0
3	Смак і присмак при 20°C	бал	0
4	Кольоровість	градус	0
5	Каламутність	мг/дм <sup>3</sup>	1,0
6	Загальне мікробне число	КУО/см <sup>3</sup>	2,5x10 <sup>1</sup>
7	Загальні коліформи	КУО/100см <sup>3</sup>	не виявлено
8	E. coli	КУО/100см <sup>3</sup>	не виявлено
9	Ентерококи	КУО/100см <sup>3</sup>	не виявлено

Дослідження питної води за санітарно-мікробіологічними та органолептичними показниками підтвердило відповідність якості водопровідної води, яка транспортується з використанням поліетиленових труб, чинним нормативним документам. Досліджена вода зі свердловини “Хоросно” та водопровідна вода КП “Пустомитиводоканал” відповідає гранично допустимим нормам ДержСанПіН 2.2.4-171-10 - I класу.

## Висновки

Дослідження внутрішньої та зовнішньої поверхні поліетиленових водопровідних труб, структури осаду та сольових відкладень встановило можливість тривалої експлуатації полімерних виробів для транспортування води. Визначено вплив якісних характеристик водопровідної води на споживні властивості поліетиленових труб при тривалій їх експлуатації. Показано, що наявність мінеральних відкладень на

внутрішній стінці труби може призвести до пониження експлуатаційних характеристик водопровідної мережі. Встановлено, що водопровідна вода, яка використовується на даний час у водопровідній мережі і відноситься до I класу згідно ДержСанПіН 2.2.4-171-10, може призводити до утворення осаду та сольових відкладень на внутрішніх стінках поліетиленових труб та збільшувати їх дефектність.

### Література

1. J. Hassinen, M. Lundback, W. Ifwarson, and U. W. Gedde, Deterioration of polyethylene pipes exposed to chlorinated water, *Polymer Degradation and Stability*, № 84, 2004 pp. 261–267.
2. S. Chung, K. Oliphant, P. Vibien, and J. Zhang, An examination of the relative impact of common potable water disinfectants (Chlorine, Chloramines and Chlorine dioxide) on plastic piping system components. URL : [http://plasticpipe.org/pdf/relative\\_impact\\_of\\_potable\\_water\\_disinfectants.pdf](http://plasticpipe.org/pdf/relative_impact_of_potable_water_disinfectants.pdf).
3. D. Castagnetti, G. Scire Mammano, and E. Dragoni, Effect of chlorinated water on the oxidative resistance and the mechanical strength of polyethylene pipes, *Polymer Testing*, № 30, 2011 pp. 277–285.
4. X. Colin, L. Audouin, J. Verdu, M. Rozental-Evesque, F. Martin, and F. Bourguine, Kinetic modeling of the aging of polyethylene pipes for the transport of water containing disinfectants, In Proc. of the plastics pipes XIII conference, 02-06 October 2006. Washington DC, USA, 2006.
5. M. Sanchez, S. Louis, M. Rozental-Evesque, B. Rabaud, and K. Glucina, Development of a “Nol ring” test to study polyethylene pipe degradation, in Proc. of PPXIV conference, 22–24 October 2008. Budapest, Hungary, 2008.
6. J. Eng, T. Sassi, T. Steele, G. Vitarelli, The Effects of Chlorinated Water on Polyethylene Pipes. URL : <http://hdpeoxidation.com/Effects%20of%20Cl%20Water%20on%20PE%20Pipes%20-%20Cytec%202011.pdf>.
7. M. Lundback, Long-term performance of polyolefins in different environments including chlorinated water: Antioxidants consumption and migration, and polymer degradation: doctoral Thesis. Stockholm, 2005. 45 p.
8. Доманцевич Н. И. Структуро- и дефектообразования при длительном старении ингибированных полимерных пленок / Н. И. Доманцевич, Б. П. Яцишин // *Физика и химия твердого тела*. – 2003. – Т.4. – № 2. – С. 323–328.
9. Скоробогатый Я. П. Старение полимерных модифицированных материалов в условиях закрытого складирования и в естественных климатических условиях / Я. П. Скоробогатый, Н. И. Доманцевич, Б. П. Яцишин // *Хим. пром-сть Украины*. – 2002. – № 1. – С. 32–34.

### References

1. J. Hassinen, M. Lundback, W. Ifwarson, and U. W. Gedde, Deterioration of polyethylene pipes exposed to chlorinated water, *Polymer Degradation and Stability*, № 84, 2004 pp. 261-267.
2. S. Chung, K. Oliphant, P. Vibien, and J. Zhang, An examination of the relative impact of common potable water disinfectants (Chlorine, Chloramines and Chlorine dioxide) on plastic piping system components. URL : [http://plasticpipe.org/pdf/relative\\_impact\\_of\\_potable\\_water\\_disinfectants.pdf](http://plasticpipe.org/pdf/relative_impact_of_potable_water_disinfectants.pdf).
3. D. Castagnetti, G. Scire Mammano, and E. Dragoni, Effect of chlorinated water on the oxidative resistance and the mechanical strength of polyethylene pipes, *Polymer Testing*, № 30, 2011 pp. 277-285.
4. X. Colin, L. Audouin, J. Verdu, M. Rozental-Evesque, F. Martin, and F. Bourguine, Kinetic modeling of the aging of polyethylene pipes for the transport of water containing disinfectants, In Proc. of the plastics pipes XIII conference, 02-06 October 2006. – Washington DC, USA, 2006.
5. M. Sanchez, S. Louis, M. Rozental-Evesque, B. Rabaud, and K. Glucina, Development of a “Nol ring” test to study polyethylene pipe degradation, in Proc. of PPXIV conference, 22-24 October 2008. – Budapest, Hungary, 2008.
6. J. Eng, T. Sassi, T. Steele, G. Vitarelli, The Effects of Chlorinated Water on Polyethylene Pipes. URL : <http://hdpeoxidation.com/Effects%20of%20Cl%20Water%20on%20PE%20Pipes%20-%20Cytec%202011.pdf>
7. M. Lundback, Long-term performance of polyolefins in different environments including chlorinated water: Antioxidants consumption and migration, and polymer degradation : doctoral Thesis / Marie Lundbäck. – Stockholm, 2005. – 45 p.
8. Domancevych N. I., Jacishyn B. P., Strukuro- i defektoobrazovanija pri dlitel'nom starenii inhibirovannyx polimernyx plenok, *Fizika i ximiya tverdogo tela*, T.4 № 2, 2003 pp. 323-328.
9. Skorobogatyj Ja. P., Domancevych N. I., Jacishyn B. P., Starenie polimernyx modifitsirovannyx materialov v uslovijax zakrytogo skladirovanija i v estestvennyx klimaticheskix uslovijax, *Xim. prom-st Ukrainy*, № 1, 2002 pp. 32-34.

Рецензія/Peer review : 19.1.2015 р.

Надрукована/Printed : 26.1.2015 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Ощипок І. М.

**СТВОРЕННЯ СУЧАСНОГО ВІТЧИЗНЯНОГО ФУНГІЦИДНОГО ПРЕПАРАТУ**

Метою даної роботи було створення сучасного вітчизняного фунгіцидного препарату для лікування мікозів. Для визначення ефективності нового засобу застосовано метод дифузії в агар, при цьому в якості тест-культури використано мікроорганізми *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Trichophyton rubrum* та *Trichophyton mentagrophytes*. В результаті дослідження, проведеного на основних збудниках мікозів, виявлено доцільність використання цинковмісної речовини як активної складової нового фунгіцидного препарату, обгрунтовано вибір лікарської форми.

**Ключові слова:** мікози, фунгіцидний препарат, крем, активна речовина.

R. KACHAN, O. ANDREYEVA, A. STROKAN  
Kyiv National University of Technologies and Design

**CREATING OF MODERN DOMESTIC ANTIFUNGAL PREPARATION**

**Abstract** – The aim of this work was to create an effective national antifungal preparation for the treatment of fungal infections, which would not only be affordable and safe, but also easy to use. In the first stage of the study the choice of cream as convenient dosage forms of a new preparation. Determined fungicidal properties of different active substances, which are compatible with the cream, for their ability to diffuse into the agar, which made planting test crops. At the same time as the test substances used silver nitrate, quaternary ammonium salts, guanidine and zinc-containing preparation, as well as test cultures used microorganisms *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Trichophyton rubrum* and *Trichophyton mentagrophytes*, which are the major causes of fungal infections. Experimentally, that the most pronounced fungicidal properties has cream based zinc material. In the future it is planned to establish the optimal treatment regimen of skin mycosis new antifungal preparation.

**Keywords:** fungal infections, antifungal preparation, cream, active substance.

**Вступ.** Незважаючи на велику кількість засобів, призначених для лікування та профілактики мікозних захворювань шкіри, останнім часом у світі спостерігається тенденція зростання даної недуги. Це пояснюється, насамперед, ослабленим імунітетом, незбалансованим харчуванням, неправильним використанням антибіотиків, гормональних та фунгіцидних препаратів. Найчастіше інфікування відбувається через контаміноване грибами взуття, килимки, рушники, а також контактні поверхні бань, душових кімнат, спортивних залів і саун.

Потрапивши на шкіру, спори та міцелії дерматофітів, перш за все, адаптуються на ділянках з мікротравмами. Сприятливим фактором для інфекційного процесу є гіпергідроз, тісне взуття, недостатній гігієнічний догляд за шкірою [1]. На початковому етапі захворювання людина відчуває легкий свербіж, виявляє слабе відлущування шкіри, але надалі, при відсутності адекватного лікування, хвороба прогресує й може привести до алергічного дерматиту, екземи і навіть астми. Крім того, незважаючи на широкий асортимент фунгіцидних засобів на українському ринку, ефективних, недорогих та зручних у використанні препаратів мало. Закордонні засоби, які добре зарекомендували себе при лікуванні грибкових захворювань шкіри, стали недоступними для пересічних громадян внаслідок різкої девальвації гривні. Слід також зазначити, що більшість фунгіцидних засобів має вузький спектр дії, токсичність, незручність у використанні.

**Постановка завдання.** Метою роботи було створення ефективного вітчизняного фунгіцидного препарату, який був би не лише доступним та безпечним, а й зручним у використанні.

**Основний матеріал.** Найчастіше шкірний покрив людини уражається наступними грибковими мікроорганізмами: *Trichophyton mentagrophytes* та *Trichophyton rubrum*, які належать до дерматофітів; *Candida albicans* – це дріжджеподібний грибок; *Aspergillus niger* – плісневий грибок. Останній досить часто виділяють як монокультуру при мікозах та у змішаній мікрофлорі під час інфекційного процесу [1]. Таким чином, створення фунгіцидного препарату з широким спектром фунгіцидної дії стає нагальною потребою. Не менш актуальним питанням являється підбір для цього препарату зручної лікарської форми.

На практиці протигрибковий засіб зручно застосовувати у вигляді таблеток, проте, це небезпечно для організму людини, тому ця форма може бути задіяна лише у тяжких випадках захворювання.

Застосування мазі мінімізує ризик потраплення значної кількості препарату у кровообіг, але після її нанесення на місце обробки протягом тривалого часу не можна надівати одяг через те, що складові мазі залишають масні плями [2].

Порівняно з мазями гелі мають більш пролонговану дію (тому більш доцільно їх використовувати на ніч перед сном), краще всмоктуються шкірою, спричиняючи при цьому її зволоження. Разом з тим, гелі вважаються нестабільною лікарською формою, що зумовлює необхідність суворого дотримання умов їх зберігання для запобігання розшарування на окремі компоненти.

До переваг фунгіцидного крему як м'якої лікарської форми на основі олії та води можна віднести:

- швидкість проникання через шкіру, що виключає системний вплив на організм;
- вільність вилучення з упаковки (туби);
- висихання вже за кілька хвилин після нанесення, без масного блиску на шкірі та забруднення

одягу;

- менша у порівнянні з мазями глибина проникнення, що запобігає потрапляння в кров'яне русло;
- охолоджуючий ефект завдяки присутності води;
- цілеспрямований косметичний вплив на шкірний покрив;
- при необхідності легке, на відміну від мазі, видалення з поверхні шкіри.

Крім того, крем може мати не лише фунгіцидні, а й імуностимулюючі властивості, що сприятиме більш швидкому загоєнню уражених ділянок шкіри. З цією метою до складу крему додають вітаміни, рослинні компоненти тощо. Як бачимо, застосування фунгіцидного препарату у вигляді крему має набагато більше позитивних властивостей порівняно з іншими вищезгаданими лікарськими формами, тому у подальших дослідженнях використали саме крем.

Технологічний процес промислового виробництва кремів складається з наступних стадій [3, 4]:

- санітарна обробка виробничої лінії (попередження мікробної контамінації);
- підготовка сировини та матеріалів;
- введення в основу біологічно активних речовин, ароматичних речовин та диспергування;
- гомогенізація крему;
- стандартизація та контроль якості;
- фасування, пакування, маркування готового продукту.

На даному етапі дослідження визначали фунгіцидні властивості активніючих речовин, сумісних з кремом: нітрат срібла, четвертинні амонійні солі, гуанідини та цинковмісний препарат.

Визначення фунгіцидної активності речовин виконували за методом «колодязів» [5], що ґрунтується на здатності речовини дифундувати в агар, на який проведено посів тест-культур. Одержані за цим методом результати дозволяють охарактеризувати фунгіцидну активність досліджуваної речовини завдяки тому, що внаслідок її дифузії у щільне поживне середовище утворюються зони затримки росту грибів. Під час експерименту у роботі використали тест-штами грибів роду *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Trichophyton rubrum* та *Trichophyton mentagrophytes*. При цьому були створені максимально сприятливі умови для культивування та визначення чутливості грибів до антибактеріальних препаратів у вигляді середовища Сабуро. Для цього у встановлені на горизонтальну поверхню чашки Петрі однакового розміру заливали по 15 мл інфікованого тест-культурою середовища Сабуро (виробник – індійська компанія «HiMedia Laboratories Pvt. Limited»).

Для вирощування та інкубації мікроорганізмів застосували термостат марки ТС-80м-2. Температурний режим культивування для *Candida albicans* – 37°C; у разі *Trichophyton mentagrophytes*, *Trichophyton rubrum* та *Aspergillus niger* – 32 °С.

Концентрацію суспензій *Candida albicans* визначали за допомогою нефелометра Densi-La-Meter-2, а суспензій *Trichophyton mentagrophytes*, *Trichophyton rubrum* та *Aspergillus niger* – за допомогою камери Горяєва.

Після застигання поживного середовища на його поверхні встановлювали циліндри, в які вносили досліджувані речовини концентрацією від 0,015 до 1,000 %. Попередні результати враховували через 24 години після початку експерименту, заключні – через 168 годин. При цьому враховували, що речовина має фунгіцидні властивості за умови, якщо зона інгібування становить не менше 1,3 см.

Таблиця 1

Визначення фунгіцидної активності досліджуваних речовин

Досліджувана речовина	Концентрація, %	Зона інгібування, см			
		<i>Candida albicans</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Trichophyton rubrum</i>	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>
1	2	3	4	5	6
Нітрат срібла	1,000	1,2	0,0	1,0	0,9
	0,500	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,250	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,125	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,060	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,030	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,015	0,0	0,0	0,0	0,0
Четвертинні амонійні солі	1,000	2,9	2,3	2,7	2,5
	0,500	2,3	1,3	1,5	1,4
	0,250	1,7	1,2	1,4	1,3
	0,125	1,5	0,0	1,2	0,0
	0,060	1,3	0,0	0,0	0,0
	0,030	1,1	0,0	0,0	0,0
	0,015	0,0	0,0	0,0	0,0



Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Гуанідини	1,000	2,8	1,4	1,6	1,4
	0,500	2,2	1,2	1,4	1,3
	0,250	1,8	0,0	1,2	1,0
	0,125	1,3	0,0	0,0	0,0
	0,060	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,030	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,015	0,0	0,0	0,0	0,0
Цинковмісна речовина	1,000	3,7	3,6	3,8	3,5
	0,500	3,2	3,1	3,3	2,9
	0,250	2,7	2,7	2,9	2,5
	0,125	1,6	1,6	1,9	1,6
	0,060	1,4	1,4	1,8	1,4
	0,030	1,2	1,2	1,5	1,3
	0,015	0,0	0,0	1,1	1,2

З наведених у таблиці даних видно, що серед усіх досліджуваних речовин найкращими фунгіцидними властивостями щодо тест-культур мікроорганізмів, що є найбільш поширеними збудниками мікозів, володіє цинковмісна речовина, здатна інгібувати всі мікроорганізми при концентрації 0,060–1,000 %, а *Trichophyton rubrum* та *Trichophyton mentagrophytes* ще в більш широкому діапазоні – від 0,030 до 1,000 %. Ось чому саме цинковмісна речовина пропонується в якості активної складової нового вітчизняного препарату.

У подальших дослідженнях планується визначити ефективний режим лікування мікозів шкіри новим фунгіцидним кремом на основі цинковмісної речовини.

#### Висновок

В результаті проведеної роботи досліджено ряд хімічних речовин, які за наведеною у літературі інформацією мають антимікробну здатність. Експериментально встановлено, що найбільш виражені фунгіцидні властивості відносно збудників мікозів виявляє цинковмісна речовина. Тому саме її запропоновано у якості активної складової нового фунгіцидного препарату, найбільш зручною лікарською формою якого вибрано крем. Це пояснюється його ефективністю та зручністю при використанні.

#### Література

1. Литус А. Профилактика микозов стоп / А. Литус, Р. Качан, К. Кобзей // Нувель Естетик. – 2011. – № 3(67). – С. 76–77.
2. Фармакология. Рецептура и практические занятия / И.С. Чекман, Н.А. Горчакова, П.А. Галенко-Ярошевский и др. ; под ред. И.С. Чекмана. – К. : ООО «Рада», 2003. – 816 с.
3. Технология косметических и парфюмерных средств : учебное пособие для студентов фармацевтических спец. высших учебных заведений / А.Г. Башура, Н.П. Половко, Е.В. Гладух и др. – Х. : Изд-во НФАУ; Золотые страницы, 2002. – 272 с.
4. Технологія косметичних засобів : методичні рекомендації до вивчення дисципліни та виконання контрольної роботи для студентів спец. 7.05140103 «Фармацевтична біотехнологія», денної та заочної форм навчання / уклад. О.Є. Макарова. – К. : НУХТ, 2012. – 39 с.
5. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. Методические указания МУК 4.2.1890-04 // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. – 2004. – Том 6, № 4. – С. 306–359.

#### References

1. Litus A., Kachan R., Kobzey K. Profilaktika mikozov stop // Nuvel Estetik. – 2011. – №3 (67). – С. 76-77.
2. Farmakologiya. Receptura i prakticheskie zanyatiya / I.S. Tsekman, N.A. Gortsakova, P.A. Galenko-Yaroshevskiy i dr.; Pod red. I.S. Tsekmana. – K.: ООО «Rada», 2003. – 816 s.
3. Tehnologiya kosmeticheskikh i parfjumernykh sredstv: Uchebnoe posobie dlya studentov farmatsevticheskikh spetsialnostey vysshikh uchebnykh zavedeniy / A.G. Bashura, N.P. Polovko, E.V. Gladuh i dr. – H.: Izd-vo NFAU; Zolotyie stranitsyi, 2002. – 272 s.
4. Tehnologiya kosmetichnykh zasobiv: Metodichni rekomendatsiyi do vivchennya distsiplini ta vikonannya kontrolnoyi roboti dlya studentiv spetsialnosti 7.05140103 «Farmatsevtichna blotekhnologiya», dennoyi ta zaochnoyi form navchannya / Uklad. O.E. Makarova. – K.: NUHT, 2012. – 39 s.
5. Opredeleniye tsuvstvitelnosti mikroorganizmov k antibakterialnim preparatam. Metoditseskie ukazaniya MUK 4.2.1890-0 // Klinicheskaya mikrobiologiya i antimikrobnaya himioterapiya. – 2004. – Tom 6, №4. – S. 306-359.

Рецензія/Peer review : 3.11.2014 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.фарм.н., проф. Страшний В.В.



## СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ОДЯГУ ПРОФІЛАКТИЧНО-ЛІКУВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті розглянуті теоретичні основи створення головних уборів лікувально-профілактичного призначення з використанням актуальних на сьогоднішній день «зелених технологій». Показана ефективність їх використання з метою профілактики та подолання ряду захворювань шкіри голови. Систематизовані основні патогенні мікроорганізми – збудники різних захворювань шкірного покриву голови. З метою лікування та профілактики запропоновано використання антисептичних препаратів на основі рослинної сировини. Проведено аналіз конструктивного устрою головних уборів та методів надання текстильним матеріалам антимікробних властивостей.

*Ключові слова:* антимікробна обробка, головний убір, захворювання шкіри, лікарські рослини

N.V. SADRETDINOVA, S.M. BEREZHENKO, K.F. KUSHNIR

Kyiv National University of Technologies and Design

## STATE AND PROSPECTS OF THE CREATION OF CLOTHING PREVENTIVE MEDICAL APPOINTMENTS

*Abstract - The article describes the theoretical basis for the creation of therapeutic and prophylactic hats using topical today "green technologies". The effectiveness of their use in the prevention and management of several diseases of the scalp was shown. The major pathogens - activators of various diseases of the scalp were systematized. In order to treat and prevent was suggested the use of antiseptic agents from plants. The hats' constructions and methods of antimicrobial treatment of textile were analyzed.*

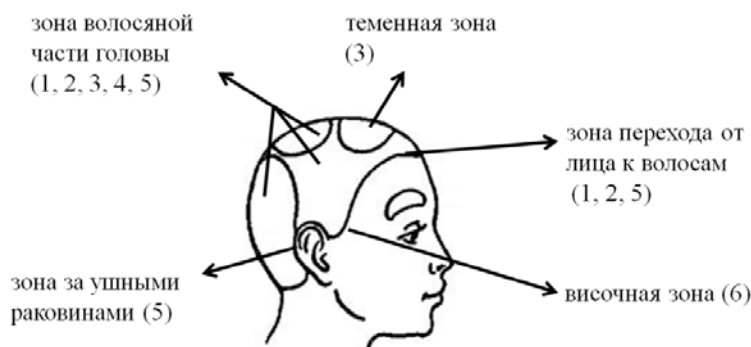
*Keywords:* antimicrobia, treatment, hat, skin diseases, medical plants.

**Постановка проблеми.** Багато десятиків років тому російський філософ, учений і літературний діяч М.Г. Чернишевський сказав: «Здоров'я ніколи не може втратити своєї ціни в очах людини, так як і в добробуті, і в розкоші погано жити без здоров'я». Ці слова особливо актуальні в наш час, коли людина розвиває і примножує все навколо себе, забуваючи про справжню цінності в житті - здоров'я. Тому однією з топ-тематик сучасних наукових досліджень в будь-якій сфері є створення ефективних засобів для запобігання захворювань та їх лікування. Враховуючи те, що з текстильними матеріалами людина контактує 24 години на добу, саме одяг, за умови надання йому лікувально-профілактичних властивостей, може стати незамінним носієм оздоровчого впливу на організм.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальність обраної тематики підтверджується аналізом сучасних досліджень. Поняття «зелені технології», «антимікробні властивості» все частіше вживаються у фаховій літературі для позначення ключових напрямків наукових розробок [1]. В якості антимікробних агентів використовуються препарати органічного або неорганічного походження. Перевага надається неорганічним сполукам на основі іонів металів (золото, срібло, мідь, цинк та ін.). Однак, використання сполук металів для антисептичної обробки тканин має певні обмеження, пов'язані з низкою небезпек як для організму людини, так і для навколишнього середовища [2, 3]. У той час як антимікробна обробка текстилю природними препаратами, маючи антисептичну, ранозагоювальну, тонізуючу дію, могла б стати гідною альтернативою хімічним засобам [4].

**Мета дослідження.** Враховуючи зазначені аспекти, метою даного дослідження є розробка інформаційного забезпечення проектування головних уборів лікувального та профілактичного призначення з використанням цілющих властивостей біологічних препаратів рослинного походження.

**Виклад основного матеріалу.** В ході виконання аналітичних досліджень було встановлено, що на поверхні голови людини зосереджено близько 20 видів мікроорганізмів. Найбільш поширеними з них, здатними викликати ряд захворювань, таких як псоріаз, екзема, себорея, трихофітія і лупа, є: дріжджовий грибок *Pityosporumovale* і його підвид *Malassezia furfur*, антропофільними грибок *Trichophyton*, бактерії



гриби:

1-*Pityosporumovale*,

2-*Malassezia furfur*,

3-*Trichophyton*,

6- *Microsporium*;

бактерії:

4-*Streptococcus sagalactiae*,

5-*Staphylococcus*.

Рис. 1. Зони локалізації патогенних мікроорганізмів шкірного покриву голови.

*Streptococcus sagalactiae* і *Staphylococcus*. Локалізуються вони в таких місцях: тім'яна і скронева зони волосяної частини голови, за вушними раковинами, зони переходу від особи до волосся, тобто на ділянках шкіри, багатих сальними залозами [5]. Для створення бактерицидної карти шкірного покриву голови були виділені локальні зони поширення певних видів мікроорганізмів (рис.1).

Таблиця 1

## Природні джерела профілактики та лікування хвороб шкірного покриву голови

Вид мікроорганізму	До якої хвороби призводить	Зона ураження	Назва лікарської рослини як антимікробного засобу
1	2	3	4
Підвиди дріжджового грибка <i>Pityrosporum ovale</i> : <i>Malassezia furfur</i> <i>Pityrosporum orbiculare</i>	Себорейний дерматит; Себорея (характерним є лущення шкіри голови, яке супроводжується запальною реакцією)	Волосяна частина голови, обличчя (тобто шкіра багата сальними залозами)	Хвощ польовий (лат. <i>Equisetum arvense</i> ) – примочки з відвару; Алое деревоподібне (лат. <i>Aloearborescens</i> ) – сік; Лапчатка (лат. <i>Potentilla</i> ) – примочки з відвару; Ромашка лікарська (лат. <i>Matricaria recutita</i> ) Черета трьохроздільна (лат. <i>Bidens tripartita</i> ) – ванни
Дріжджовий грибок <i>Malassezia Furfur</i>	Лупа (проявляється появою лусочок світлого кольору)	Волосяний покрив голови	Грецький горіх (лат. <i>Juglans regia</i> ) – сік зеленої незрілої шкаралупи; Настурція (лат. <i>Tropaeolum</i> ) – відвар для миття і полоскання волосся; Кропива (лат. <i>Urtica</i> ) – відвар; Алое деревоподібне (лат. <i>Aloearborescens</i> ) – сік; Чайне дерево (лат. <i>Melaleuca</i> ) – ефірна олія
Бактерія <i>Streptococcus agalactiae</i> (стрептококи групи В)	Псоріаз (проявляється утворенням червоних, надмірно сухих, припіднятих над поверхнею шкіри плям - так званих папул, які зливаються між собою, утворюючи бляшки)	Волосяний покрив голови	Мильнянка лікарська (лат. <i>Saponaria officinalis</i> ) - ванни; Обліпиха (лат. <i>Hippórrhaë</i> ) – масло для внутрішнього і зовнішнього використання; Чистотіл звичайний (лат. <i>Chelidonium majus L.</i> ) – сік; Календула лікарська (лат. <i>Caléndula officinalis</i> ) – відвар; Звіробій (лат. <i>Hypericum</i> ) – відвар
Грибки роду <i>Candida</i> ; бактерії <i>Staphylococcus aureus</i> ; <i>Staphylococcus epidermidis</i> ; дріжджовий грибок <i>Pityrosporum ovale</i>	Себорейний дерматит (проявляється висипаннями дрібних вузликів, які поступово утворюють бляшки, покриті щільними жирними лусочками, при видаленні яких відкривається волога поверхня)	Волосяна частина голови, обличчя, за вушними раковинами	Шалфей (лат. <i>Salvia</i> ) – примочки з відвару; Дуб (лат. <i>Quercus</i> ) – відвар кори втирають у шкіру; Чайне дерево (лат. <i>Melaleuca</i> ) – ефірна олія; Ромашка лікарська (лат. <i>Matricaria recutita</i> ) – відвар; Лопух (лат. <i>Árctium</i> ) – масло для нанесення на шкіру
Бактерії <i>Staphylococcus aureus</i> ; <i>Staphylococcus epidermidis</i>	Екзема (Характеризується поліморфними висипаннями, що проходять стадії почервоніння - утворення вузликів - бульбашок - мокнучих ерозій - шкоронок – лущення)	Обличчя та перехідна зона	Мати-й-мачуха (лат. <i>Tussilágo</i> ) – компрес; Каланхое (лат. <i>Kalanchoë</i> ) – сік; Овес (лат. <i>Avéna</i> ) – для обмивання і ванн; Цикорій (лат. <i>Cichórium</i> ) – відвар для примочок; Рогоглавник пряморогий (лат. <i>Seratosephala</i> ) – сік; Береза (лат. <i>Bétula</i> ) – сік для зовнішнього застосування
Грибки роду <i>Trichophyton</i> , <i>Microsporum</i> <i>Epidermophyton</i>	Трихофітія (стригучий лишай)(червонуваті кільцеподібні плями, що викликають свербіж і коросту, ураження коренів волосся і облісіння передньої частини черепа, супроводжується лупою)	Волосяна частина голови, тім'яна зона	Часник (лат. <i>Állium satívum</i> ) – сік; Подорожник (лат. <i>Plantágo</i> ) – сік; Мильнянка лікарська (лат. <i>Saponaria officinalis</i> ) – відвар для примочок; Ромашка лікарська (лат. <i>Matricaria recutita</i> ) – відвар для примочок

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Грибки Trichophytonschonleinii, Trichophytonquinskeanum Zopf	Фавус (Парша) (навколо волосся утворюються білувато-жовті нашарування; все уражене волосся обов'язково випадає, в місцях ураження розвивається атрофічні і рубцеві зміни, які призводять до стійкої алопеції (облісіння))	Волосяна частина голови, гладка шкіра	Медуниця лікарська (лат. Pulmonariaherba) – відвар; Золототисячник(лат.Centaurium) – відвар; Полинь (лат. Artemisia) – відвар; Бересклет(лат. Euonymus) – порошок із сушених плодів
Грибки Microsporiumferrugineum, Microsporium Audonii, Microsporiumcanis, Microsporiumfolineum	Мікроспорія (на волосистій частині голови з'являються уражені плями, в областях яких волосся обламано на рівні шести-восьми міліметрів від коріння. Залишки волосся щільно покриті білими спорами гриба)	Волосяна частина голови (тім'яна, скронева зони), гладка шкіра	Календула лікарська (лат. Caléndula officinális) – настоянка для зовнішнього застосування; Береза (лат. Bétula) – бруньки для зовнішнього застосування; Часник (лат. Állium satívum) – кашиця; Осокір (лат. Pópulus nígra) – настоянка з кори

З урахуванням видів основних збудників захворювань шкірного покриву голови складено перелік рослин, які традиційно використовуються в народній медицині для пригнічення життєдіяльності колоній зазначених мікроорганізмів, або їх знищення [4, 5]. Найбільш дієвими і універсальними у перешкоджанні розвитку патогенної мікрофлори шкіри голови є такі лікарські рослини, як ромашка, чайне дерево, мильнянка, календула і часник.

Для отримання стійкого лікувального ефекту необхідний постійний / періодичний контакт активних речовин, що містяться в складеному переліку лікарських рослин, з ураженими ділянками поверхні голови, що практично може бути реалізовано шляхом тривалого використання головного убору, що містить деталі, модифіковані рослинними препаратами. При цьому важливе значення має зовнішній вигляд виробу і його конструктивний устрій. Забезпечити лікувальний ефект з одночасним урахуванням естетичних вимог споживача до зовнішнього вигляду виробу, що проектується, можливо за умови цілеспрямованого підбору конструктивного устрою головних уборів або ж за умови використання знімних деталей, які кріпляться до головного убору з внутрішньої сторони. Різноманітність можливих конструкцій обмежується необхідністю нанесення на деталі головного убору антимікробної композиції, що на сьогоднішній день може здійснюватися одним з таких методів [6]:

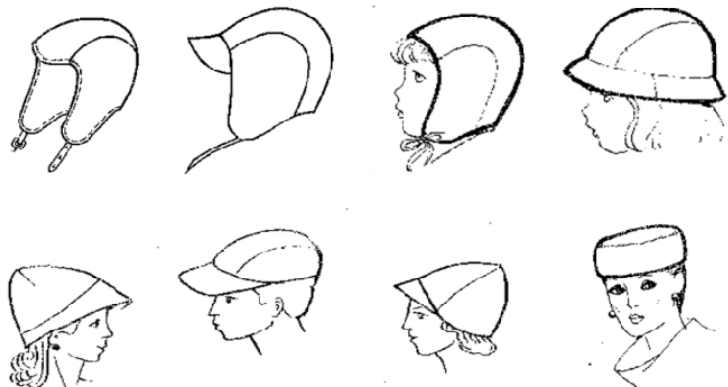


Рис. 2. Варіанти конструктивних рішень головних уборів лікувально-профілактичного призначення

1) просочення текстильного матеріалу, об'єднане з такими технологічними процесами як фарбування, заключна обробка, або як самостійна операція;

2) введення бактерицидних препаратів в прядильний розчин або розплав в процесі його формування;

3) використання технології текстильного друку, при цьому нанесена на нетканий матеріал композиція (аналог друкарської фарби) являє собою біополімер (згущувач) з нанесеним лікарським препаратом;

4) розпилення на різних етапах виробництва текстильного матеріалу;

5) введення антимікробних препаратів при виробництві нетканих матеріалів в сполучну речовину.

Враховуючи локальне розміщення хвороботворних мікроорганізмів на поверхні голови, для обробки головного убору рекомендується використання третього і четвертого варіантів, які дадуть можливість зосередити лікувальний вплив препаратів в місцях найбільшого скупчення патогенної мікрофлори.

Проаналізувавши варіанти конструктивних рішень [7] для головних уборів лікувально-профілактичного призначення можна запропонувати конструкції, що мають мінімум конструктивних членувань, і є зручними у використанні згідно призначення (рисунок 2).

**Висновки.** Таким чином, в результаті проведених досліджень, підтверджена можливість використання лікарських рослин для подолання низки хвороб шкіри голови, складено перелік таких рослин,

проаналізовано конструктивну будову головних уборів і методи надання текстильним матеріалам антимікробних властивостей, на основі чого розроблено теоретичні основи створення головних уборів лікувально-профілактичного призначення, показана ефективність їх використання з метою профілактики та подолання ряду захворювань шкіри голови. Реалізація розглянутого підходу можлива в процесі проектування і виготовлення головних уборів лікувально-профілактичного призначення.

### Література

1. Yanarella, E.J., Levine, R.S. and Lancaster, R.W. Research and Solutions: "Green" vs. Sustainability: From Semantics to Enlightenment // Sustainability: The Journal of Record. October 2009, 2(5), pp. 296-302.
2. B. Pourdeyhimi, Textiles Nanotechnology, Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Second Edition, William A. Goddard III, Donald W. Brenner, Sergey E. Lyshevski, Gerald J. Iafrate (Eds.), CRC Press, (2007) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inda.org/about-inda/inda-hall-of-fame/entries/benham-pourdeyhimi/#sthash.lAkBvfX9.dpuf>.
3. Галик І.С. Екологічна безпека та біостійкість текстильних матеріалів: монографія / Галик І.С., Концевич О.Б., Семак Б.Д. – Львів: Видавництво Львівської комерційної академії, 2006– 232 с.
4. Божья аптека Лечение дарами природы Издательство: Братство святого апостола Иоанна Богослова, 2010, - 768 с.
5. Кулага В. В., Романенко И. М., Афонин С. Л., Кулага С. М. Аллергия и грибковые болезни. Руководство для врачей — Луганск: «Элтон-2», 2005. — 520 с.
6. Кричевський Г.Е Химическая технология текстильных материалов Учеб для вузов в 3-х томах Т.3.: Заключительная отделка текстильных материалов / Кричевский Г.Е– М., 2001– 298 с.
7. Рывтинская Л.Б., Плужникова Л.И., Меркулова Л.А., Орлова-Смородина И.Г Моделирование, конструирование и технология обработки головных уборов Учебное пособие для кадров массовых профессий- М.: Легпромбытиздат, 1985- 320 с.

### References

1. Yanarella, E.J., Levine, R.S. and Lancaster, R.W. Research and Solutions: "Green" vs. Sustainability: From Semantics to Enlightenment // Sustainability: The Journal of Record. October 2009, 2(5), pp. 296-302.
2. B. Pourdeyhimi, Textiles Nanotechnology, Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Second Edition, William A. Goddard III, Donald W. Brenner, Sergey E. Lyshevski, Gerald J. Iafrate (Eds.), CRC Press, (2007) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inda.org/about-inda/inda-hall-of-fame/entries/benham-pourdeyhimi/#sthash.lAkBvfX9.dpuf>.
3. Galik I.S Ekologichna bezpeka ta bsostryksyt tekstilnih matersalsv: monografiya / Galik I.S., Kontsevich O.B., Semak B.D.– Lvsv: Vidavnitstvo Lvsvsckoyi komertssynoyi akademiyi, 2006– 232 s.
4. Bozhya apteka Lechenie darami prirody Izdatelstvo: Bratstvo svyatogo apostola Ioanna Bogoslova, 2010, - 768 s.
5. Kulaga V. V., Romanenko I. M., Afonin S. L., Kulaga S. M. Allergiya i gribkovyye bolezni. Rukovodstvo dlya vrachey — Lugansk: «Elton-2», 2005. — 520 s.
6. Krichevskiy G.E Himicheskaya tehnologiya tekstilnih materialov Ucheb dlya vuzov v 3-h tomah T.Z.: Zaklyuchitelnaya otdelka tekstilnih materialov / Krichevskiy G.E– M., 2001– 298 s.
7. Rytvinskaya L.B., Pluzhnikova L.I., Merkulova L.A., Orlova-Smorodina I.G Modelirovanie, konstruirovanie i tehnologiya obrabotki golovnyih uborov Uchebnoe posobie dlya kadrov massovyih professiy- M.: Legprombytizdat, 1985- 320 s.

Рецензія/Peer review : 26.2.2015 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Березненко М.П.

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 № 7 від 29.01.2015 р.

Підп. до друку 29.01.2015 р. Ум.друк.арк. 19,76 Обл.-вид.арк. 24,22

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