ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2019

ВІСНИК Хмельницького національного університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 6, Volume 279

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
Серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання (перереєстрація), група «Б»
наказ МОН України від 28.12.2019, № 1643

Засновано в липні 1997 р. ***Виходить 6 разів на рік***

Хмельницький, 2019, № 6 (279)

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

Включено до наукометричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
РИНЦ	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

Головний редактор	**Скиба М. Є.**, д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету.
Заступник головного редактора	**Синюк О. М.**, д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.
Відповідальний секретар	**Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

Члени редколегії

Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., **Бойко Ю.М.,** д.т.н., **Говорущенко Т.О.,** д.т.н., **Гордєєв А.І.,** д.т.н., **Грабко В.В.,** д.т.н., **Диха О.В.,** д.т.н., **Захаркевич О.В.**, д.т.н., **Злотенко Б.М.**, д.т.н., **Зубков А.М.**, д.т.н., **Каплун П.В.**, д.т.н., **Карташов В.М.**, д.т.н., **Кичак В.М.**, д.т.н., **Мазур М.П.**, д.т.н., **Мандзюк І.А.**, д.т.н., **Мартинюк В.В.**, д.т.н., **Мельничук П.П.**, д.т.н., **Місяць В.П.**, д.т.н., **Мясіщев О.А.**, д.т.н., **Нелін Є.А.**, д.т.н., **Павлов С.В.**, д.т.н., **Параска О.А.,** к. т. н., **Прохорова І.А.**, д.т.н., **Рогатинський Р.М.**, д.т.н., **Горошко А.В.**, д.т.н., **Сарібекова Д.Г.**, д.т.н., **Семенко А.І.**, д.т.н., **Славінська А.Л.**, д.т.н., **Сорокатий Р.В.**, д.т.н., **Харжевський В.О.**, д.т.н., **Шинкарук О.М.**, д.т.н., **Шклярський В.І.**, д.т.н., **Щербань Ю.Ю.**, д.т.н., **Ясній П.В.**, д.т.н., проф., **Бубуліс Альгімантас**, доктор наук **(Литва)**, **Елсаєд Ахмед Ельнашар**, доктор наук **(Єгипет)**, **Кальчиньскі Томаш**, доктор наук **(Польща)**, **Коробко Євгенія Вікторівна**, д.т.н. **(Білорусія)**, **Лунтовський Андрій Олегович**, д.т.н. **(Німеччина)**, **Матушевський Мацей,** доктор наук **(Польща)**, **Мушлевський Лукаш,** доктор наук **(Польща)**, **Мушял Януш**, доктор наук **(Польща)**, **Натріашвілі Тамаз Мамієвич**, д.т.н. **(Грузія)**, **Попов Валентин,** доктор природничих наук **(Німеччина)**

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

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 12 від 28.12.2019 р.

Адреса: редакція журналу «Вісник Хмельницького національного університету»
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

☎ (038-2) 67-51-08 **web:** http://journals.khnu.km.ua/vestnik
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

e-mail: visnyk.khnu@gmail.com

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, 2019
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2019

2019

ЗМІСТ

берез

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

М.М. КОСІЮК, В.С. КРАВЧУК
КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СФЕРИЧНОГО КРИВОШИПНО-ПОВЗУННОГО МЕХАНІЗМУ 7

Ю.В. САВИЦЬКИЙ, О.А. ГОРДЄЄВ
ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГЛИБОКОГО ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ
ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТОЧНИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «СТАКАН». ЧАСТИНА 2 12

О.О. НЕМЧУК, В.В. СТРЕЛЬБІЦЬКИЙ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАПРАЦЮВАННЯ
НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ 16

О.Г. ТИМОЩУК
РОЗРОБКА І АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ
ГЕРМЕТИЧНОСТІ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ
ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ТА ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМІВ ПЕРЕТІКАННЯ ГАЗУ 20

Л.М. БЕРЕЗІН, К.В. САВЧЕНКО
МОДЕЛЮВАННЯ ПОДАТЛИВОЇ ГРАНІ КЛИНУ СКЛАДНОЇ ФОРМИ
ЗА КРИТЕРІЯМИ ДЕФОРМАЦІЇ ТА МІЦНОСТІ 24

Л.В. ПРИСЯЖНИЙ, Є.А. УРБАНЮК
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ
МАТРИЦЬ ПРЕС-ФОРМ 28

Н.О. КОСТЮК, А.І. ГОРДЄЄВ, О.А. ГОРДЄЄВ
ОБҐРУНТУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ 36

Ю.В. БАТЫГИН, С.А. ШИНДЕРУК, Е.А. ЧАПЛЫГИН, Е.Ф. ЕРЁМИНА, Б.В. БОРИСЕНКО
ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ВНЕШНИМ БИФИЛЯРНЫМ СОЛЕНОИДОМ.
АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ 44

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Л.В. ПЕЛИК, О.В. ОСТАПЧУК, Ю.А. ПЕЛЕХ
ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ТРИВКОСТІ НАБИВНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
З ЕФЕКТОМ СУБЛІМАЦІЇ 49

О.В. ПАХОЛЮК, Г.О. ПУШКАР, І.С. ГАЛИК, Б.Д. СЕМАК
ТОВАРОЗНАВЧІ ТА МАРКЕТИНГОВІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ
ВІТЧИЗНЯНОГО РИНКУ НАНОТЕКСТИЛЮ І ОДЯГУ 53

А.Ю. СТАНКО, О.М. ЛУЩЕВСЬКА
ДИЗАЙН-ПРОЕКТУВАННЯ АВТОРСЬКОГО АНСАМБЛЮ ОДЯГУ
З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНТУ «ЕФЕКТ ДЕГРАДЕ» 58

А.І. БАБИЧ, В.О. МОВША, В.П. НЕМИРОВЕЦЬ, Г.К. ДЖИБУ
ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШКІРЯНИХ МАТЕРІАЛІВ
І ГОТОВОГО ЧОЛОВІЧОГО ПОВСЯКДЕННОГО ВЗУТТЯ
З ПОКРАЩЕНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 64

С.Є. КАМЕНЕЦЬ, А.І. ТІХОВА
ВИКОРИСТАННЯ В ШКІРГАЛАНТЕРЕЙНИХ ВИРОБАХ ТА ВЗУТТІ
НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ 70

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ, Я. ЦИМБАЛ
РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕТРИКІВСЬКОГО РОЗПИСУ 75

В.Г. ЄФІМОВА, Т.М. ПИЛИПЕНКО
РОЗРОБКА СКЛАДУ КОСМЕТИЧНОГО ЕМУЛЬСІЙНОГО КРЕМУ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАСЛА З КІСТОЧОК ГРАНАТУ
ТА ВИВЧЕННЯ ЙОГО ЕМУЛЬСІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ 80

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

В.П. МАРЦЕНЮК, А.С. СВЕРСТЮК, О.М. КУЧВАРА, Н.В. КОЗОДІЙ, Г.П. ШМИГЕР
ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ R ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕШІТЧАСТИХ ЗОБРАЖЕНЬ
ФЛУОРЕСЦІЮЮЧИХ ПІКСЕЛІВ В КІБЕРФІЗИЧНИХ БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ 84

Г.М. НОВІЦЬКИЙ, С.М. ЗЛЕПКО, Л.Г. КОВАЛЬ, В.О. ГОМОЛІНСЬКИЙ
МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ РИСУНКА ВЕН ДОЛОНІ ЗА КЛЮЧОВИМИ ТОЧКАМИ 93

В.В. ЯЦКІВ, С.В. КУЛИНА
МЕТОД НАДІЙНОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ
НА ОСНОВІ НАДЛИШКОВОЇ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ 98

А.О. АЗАРОВА, А.А. ШИЯН, С.П. МУРЗА, А.В. КУДЛИК, Т.С. КОСТЮК
РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХИЩЕНОГО КОНСОЛІДОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ
АНАЛІЗУ РИНКУ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕДИЧНИМИ ЛАБОРАТОРІЯМИ В УКРАЇНІ 105

О.В. КРУЛІКОВСЬКИЙ, С.Д. ГАЛЮК
ЦИКЛІЧНІСТЬ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ,
ГЕНЕРОВАНИХ МЕМРИСТОРНОЮ ХАОТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ 110

Н.І. ПРАВОРСЬКА
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 116

М.С. ГИКАВЧУК, С.С. ПЕТРОВСЬКИЙ, Т.К. СКРИПНИК
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ КОНКУРЕНТОЗДАТНОСТІ ВЕБ-ПОРТАЛІВ 120

В.І. СТЕЦЮК, В.В. КОВАЛЕНКО
МЕТОДИ ОБРОБКИ МОВНИХ КОМАНД СИСТЕМ ГОЛОСОВОГО КЕРУВАННЯ 125

М.М. ЛЕБІГА, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК, В.Ю. МЕДВЕДЧУК
КОМБІНОВАНИЙ АЛГОРИТМ СТИСНЕННЯ ДАНИХ,
ПРЕДСТАВЛЕНИХ В ТЕКСТОВОМУ ФОРМАТІ 131

Ю.І. ЯЦИНИЧ, В.П. РОЙЗМАН, А.В. ГОРОШКО
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ
ГЕРМЕТИЗОВАНИХ МІКРОСКЛАДАНЬ НВЧ-МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ 134

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, В.М. СЕРЕБРЕНИКОВ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, І.В. РАСЧЕХМАРОВ
УЛЬТРАЗВУК ЯК АНАЛІЗАТОР МОНІТОРИНГУ СТАНУ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ 138

В.Р. ЛЮБЧИК, В.І. СТЕЦЮК, О.С. КАРПІНСЬКИЙ, В.П. НЕЗДОРОВІН
МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ І СПЕКТРОЗОНАЛЬНИХ ДАНИХ 143

О.С. ПИВОВАР, О.О. МИХАЛЬЧУК, І.О. ВЕРЕМІЙЧУК
ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ
ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЬОЇ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ 149

А.С. КАШТАЛЬЯН, О.В. КАШТАЛЬЯН
ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ РОЗШИРЕНОЮ ЗГОРТКОВОЮ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ ... 155

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Д.С. ПАРТИКА
ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ
ПЛОСКОЇ ЕКВІДИСТАНТНОЇ РІВНОАМПЛІТУДНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ
ЗАЛЕЖНО ВІД ДОВЖИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ,
КІЛЬКОСТІ ВИПРОМІНЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ВІДСТАНІ МІЖ НИМИ 161

М.С. МОЯРЕНКО, В.П. РОЙЗМАН, А.В. ГОРОШКО
ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМ І ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ 168

Д.В. БОНДАР, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК
ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ПРИ ОСАДЖЕННІ МІКРОЧАСТИНОК 172

Д.Ю. ЗУБЕНКО, О.М. ПЕТРЕНКО
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ
ДЛЯ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ 175

М.О. ГРИЩУК, О.Є. РУБАНЕНКО, І.О. ГУНЬКО
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ФОТОВОЛЬТАІЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ 178

А.В. КОВАЛЬ, А.Г. ТКАЧУК, М.С. ГРИНЕВИЧ, Т.Л. КОВАЛЬ
МОБІЛЬНА БЕЗДРОТОВА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ 184

О.К. КУЧЕРЕНКО, Б.В. КИРИЧУК
ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ПОЗИЦІЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОБ'ЄКТИВІВ
ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ 192

Т.Б. МАРТИНЮК, А.В. КОЖЕМ'ЯКО, Л.М. КУПЕРШТЕЙН, О.С. БЕЗКРЕВНИЙ
ОПЕРАЦІЙНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ БАЗИС ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ 197

В.М. СОКУРЕНКО, І.О. СМАЖКО
АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ SWIR-ОБ'ЄКТИВА 202

В.М. СОКУРЕНКО, О.В. ТРОСТЯНСЬКА
СИНТЕЗ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКУЛЯРА
ДЛЯ МІКРОДИСПЛЕЯ З ВИСОКОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ 206

В.Т. КОНДРАТОВ
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ
СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО.
ЧАСТЬ 9. МАГНИТПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 211

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

А.С. ЗЕНКІН, С.В. САЛАТА
ОЦІНКА ЯКОСТІ І БЕЗПЕЧНОСТІ СЛАБОАЛКОГОЛЬНИХ И БЕЗАЛКОГОЛЬНИХ НАПОЇВ
ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА 222

О.І. СТРЕМЕЦЬКИЙ, А.Я. ГАНЗЮК, О.П. ШЕЛЕСТЮК, А.А. МАЛЬОВАНА
ВПЛИВ МЕТАНУ НА ПРОЦЕС АНОДНОГО ТРАВЛЕННЯ АЛЮМІНІЮ 227

О.О. ЯРЕМЕНКО, Н.О. ЯРЕМЕНКО, І.М. МИРОНЕНКО
ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ КЕСОННІ ПЕРЕКРИТТЯ 233

С.С. ПЕТРОВСЬКИЙ, Т.К. СКРИПНИК, О.Ю. ІВАНОВ
ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ЖУРНАЛЬНИХ СИСТЕМ
ДЛЯ НАУКОВИХ ВИДАНЬ З ДОСЛІДЖЕНЬ ОСВІТНЬОГО НАПРЯМКУ 237

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-7-11
УДК 621.01

М.М. КОСІЮК, В.С. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СФЕРИЧНОГО КРИВОШИПНО-ПОВЗУННОГО МЕХАНІЗМУ

Розглянуто питання розробки механізмів для перетворення обертального руху в коливальний рух і навпаки, які сприяли б реалізації машин з більш зручною компоновкою. Розглянуті структура та принцип роботи оборотного перетворювача напрямку руху на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму. Його унікальність полягає в тому, що осі симетрії всіх деталей, які обертаються і рухаються, перетинаються лише в одній точці, при цьому немає потреби у балансуванні інерційних мас, немає вібрації, досягаються високі характеристики з надійності та ресурсу роботи. Проведено кінематичний аналіз перетворювача руху. Перетворювач руху може використовуватися у різних галузях і виконувати різні функції, зокрема, як виконавчий механізм компресорів, насосів, пневмо- і гідромоторів, а також у складі трансмісій інших пристроїв.

Ключові слова: оборотні машини, перетворювач руху, кривошипно-повзунний механізм, сферичний механізм, кінематика.

M.M. KOSIYUK, V.S. KRAVCHUK
Khmelnytskyi National University

KINEMATIC ANALYSIS OF A SPHERICAL CRANK-SLIDE MECHANISM

Reverse cars of volume replacement which support at least one working body installed in the case with a possibility of oscillating motion and the converter the direction of the movement, capable to perceive or rotations of an entrance shaft with its transformation to oscillatory the movement of the blade, or oscillatory the movement of working body on its transformation to rotary the movement of an output shaft are widely used in engineering. Engineering thought requires the development of new mechanisms that would facilitate the implementation of machines with a more convenient layout, be compact, have better properties on vibrations, frequency spectrum, and balance. The original solution is a spherical crank mechanism for reverse direction converters. Its uniqueness is that the axes of symmetry of all working parts, which wrap and move, intersects only at one point, at the same time there is no need to balance inertial masses, there is no vibration. High characteristics with reliability and service life are achieved. Structure and operating principle of the reverse converter of the direction of motion on the basis of the spherical crank-bearing mechanism are considered. A mathematical model was obtained, which allowed to perform analytical studies of mechanism kinematics using MathCAD program. A "tool for modelling the specified mechanism in the program SolidWorks using the SolidWorks Motion Engineering System was performed. Results of kinematic study in the form of tables and graphs are given. Comparisons of the results of calculations of the mathematical model and the designed 3D model of the mechanism confirm their compliance. The work is planned to continue in the direction of optimization synthesis of the mechanism according to various criteria, which is important for its practical use.

Key terms: rotation machines, transducer of movement, crank-sliding mechanism, spherical mechanism, kinematics.

Вступ

У техніці широко використовують оборотні машини об'ємного витиснення (далі – оборотні машини), які містять щонайменше один робочий орган (зазвичай, лопать), встановлений у корпусі з можливістю коливального руху, і перетворювач напрямку руху, здатний сприймати або обертання вхідного вала з перетворенням його в коливальний рух лопаті, або коливальний рух лопаті з перетворенням його в обертальний рух вихідного вала. Розробка кінематичних схем і конструкцій, механізмів для перетворення обертального руху в коливальний (тобто зворотно-обертальний) рух і навпаки є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оборотними перетворювачами напрямку руху для поршневих гідро- або пневмоциліндрів зазвичай служать кривошипно-шатунні механізми [1]. Практика показала, що ці механізми надійні і ремонтопридатні, оскільки практично цілком розташовані поза робочим об'ємом зазначених оборотних машин і характеризуються прийнятними втратами на тертя. Однак вони несумісні з оборотними машинами на основі поворотних гідро- чи пневмоциліндрів з одно- чи двостулковими лопатями.

Цікавим рішенням приводу для роторно-лопатевої машини є механізм з некруглими зубчастими колесами [2]. Такий механізм перетворює обертальний рух вхідного вала безпосередньо у коливальний рух лопатей. В цьому випадку інерційні сили і пов'язані з ними коливання у радіальному напрямку повністю врівноважуються і залишаються тільки крутильні складові. Недоліком відомого пристрою можна вважати складність конструкції, що обмежує його широке практичне застосування. Інженерна думка вимагає розробки нових механізмів, які сприяли б реалізації машин з більш зручною компоновкою, були б компактні, мали б кращі властивості за вібрацією, частотним спектром, врівноваженістю.

Оригінальним рішенням є сферичний кривошипно-повзунний механізм для оборотних перетворювачів напрямку руху, у якому геометричні осі усіх установлених з можливістю обертання деталей перетинаються в одній «центральній» точці [3, 4]. Він і є об'єктом цього дослідження.

Застосування інформаційних технологій значною мірою допомагає інженерам і науковцям у розробленні нових механізмів. Сучасні системи автоматичного моделювання мають значні переваги над традиційними методами проектування. Сьогодні на допомогу інженерові приходять нові, більш досконалі

інструменти проектування. До найуживаніших в Україні модулів можна віднести програму КОМПАС, яка має бібліотеку анімації, модуль Dynamic Simulation, що підключається до програми Autodesk Inventor, модуль SolidWorks Motion програми SolidWorks. Одержали широке застосування такі потужні пакети математичного моделювання, які не вимагають спеціальних знань в програмуванні, – це Maple, MATLAB, Mathcad тощо [5, 6].

Мета статті – кінематичне дослідження оборотного перетворювача руху на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму з використанням програм Mathcad і SolidWorks.

Виклад основного матеріалу дослідження

Кінематичний аналіз механізмів – необхідний етап у розробленні нових й оптимізації роботи вже існуючих. На ранніх етапах проектування перед інженером постає питання про працездатність механізму в цілому, причому з точки зору не тільки забезпечення міцності окремих його частин, а й взаємодії частин і вузлів у процесі роботи [7, 8].

На рис. 1 зображено 3D-модель сферичного кривошипно-повзунного механізму, у якому геометричні осі усіх установлених з можливістю обертання деталей перетинаються лише в одній точці, розташованій на осі обертання валу 1. В корпусі (не показано) встановлено вал 1 у двох протилежних співвісних підшипниках 2, який може служити вхідним (ведучим) чи вихідним (відомим) валом для щонайменше однієї оборотної машини об'ємного витиснення переважно на основі щонайменше одного поворотного пневмо- чи гідроциліндра. Кривошип 3 жорстко зв'язаний з валом 1 у його середній частині, має кільцевий паз, симетричний щодо площини, що нахилена до геометричної осі вала 1 і включає згадану вище точку. Паз служить для жорсткого закріплення цілісного внутрішнього кільця підшипника котіння 4. Повзун 5, який виконаний на основі зовнішнього кільця підшипника котіння, має кінематичний зв'язок через стрижневі проміжні елементи 6 та втулки 7 з коливальною кінематичною ланкою (обоймою) 8, яка з безперервним зазором вільно охоплює повзун 5 і жорстко зв'язана з двома валами 9, що встановлені в підшипниках 2, так, що їх спільна геометрична вісь перпендикулярна спільній геометричній осі підшипників 2 вала 1. Вали 9 призначені для підключення джерела чи споживача коливального руху.

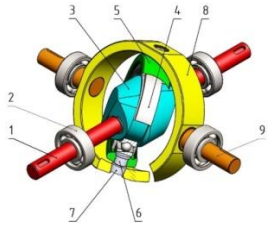
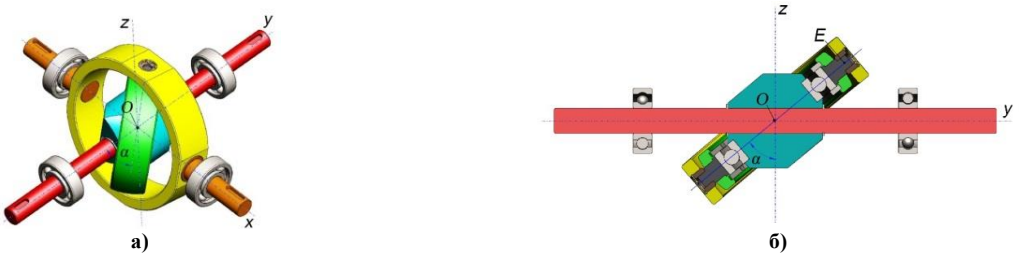


Рис. 1. 3D-модель сферичного кривошипно-повзунного механізму

Для такого механізму необхідно окремо визначити кінематичні параметри руху його ланок і, в першу чергу, робочого органу – обойми 8. Для кінематичного аналізу використаємо розрахункову схему оборотного перетворювача напрямку руху, зображену на рис. 2.



а) **б)**

Рис. 2. Розрахункова схема сферичного кривошипно-повзунного механізму

Зазначений на рис. 2 кут «α» між площиною симетрії кільцевого паза кривошипа 3 і геометричною віссю вала 1 з вершиною в центральній точці «О» теоретично може бути обраний між 0° і 90°. Реально ж величину «α» вибирають з урахуванням геометричної форми і розмірів кривошипа 3 і повзуна 5 між 30° і 80°. Забезпечити кут «α» менш 30° удається лише шляхом конструктивних хитрувань, а задавати величину «α» більш 80° практично недоцільно, оскільки це різко скорочує амплітуду коливань обойми.

Виберемо нерухому праву декартову систему координат *xyz*, як показано на рис. 2 (вісь абсцис *x* направлена вздовж осей напіввалів; вісь ординат *y* – по осі вала 1 вверх; вісь аплікат *z* – перпендикулярно до площини рисунка на нас). Рухому декартову систему координат $x_1y_1z_1$ пов'яжемо з повзуном. При цьому, очевидно, осі *y* і y_i будуть співпадати. За початковий момент часу приймемо момент, що зображений на рис. 2, тобто в цей час нерухома і рухома система координат співпадають. Будемо рахувати, що вал обертається з кутовою швидкістю ω за годинниковою стрілкою, якщо дивитися з кінця осі *y*. При повороті вала на довільний кут $\varphi=\omega\cdot t$ (*t* – час) зв'язок між координатами в рухомій та нерухомій системах буде таким:

$$\begin{cases} x_1 = x\cdot\cos\varphi + z\cdot\sin\varphi; \\ y_1 = y; \\ z_1 = z\cdot\cos\varphi - x\cdot\sin\varphi. \end{cases} \quad (1)$$

Координати середньої лінії зовнішньої поверхні повзуна в рухомій системі координат повинні задовольняти рівнянню кулі та рівнянню площини, а саме:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = R^2; \\ y_1 = x_1\cdot\mathrm{c}\tan\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

Тут *R* – радіус повзуна. Рівняння середньої лінії повзуна в нерухомій системі координат матимемо із рівнянь (2), підставивши туди формули (1). Одержимо

$$\begin{cases}(x\cdot\cos\varphi+z\cdot\sin\varphi)^2+(z\cdot\cos\varphi-x\cdot\sin\varphi)^2\cdot\sin^2\alpha=R^2\cdot\sin^2\alpha;\\ y=(x\cdot\cos\varphi+z\cdot\sin\varphi)\cdot\mathrm{c}\tan\alpha.\end{cases}\tag{3}$$

Центр стержня 6 знаходиться одночасно на повзуні, на лопатці і в площині *yz*. Тому координати його центра (x_c, y_c, z_c) повинні задовольняти системі рівнянь (3) і рівнянню

$$x=0.\tag{4}$$

Розв'язуючи сумісно систему рівнянь (3) і (4), одержимо

$$\begin{cases}x=0;\\ y=\dfrac{R\cdot\sin\varphi\cdot\cos\alpha}{\sqrt{\sin^2\varphi+\cos^2\varphi+\sin^2\alpha}};\\ z=\pm\dfrac{R\cdot\sin\alpha}{\sqrt{\sin^2\varphi+\cos^2\varphi+\sin^2\alpha}}.\end{cases}\tag{5}$$

Знак "+" при координаті *z* відноситься до стрижня, що зображений на рис. 1 (ближче до нас), а знак "-" – до стрижня, що знаходиться з протилежної сторони водила. В подальшому будемо досліджувати рух ближнього стрижня, тому у виразі для *z* виберемо знак "плюс".

Враховуючи, що при рівномірному обертанні вала кут $\varphi=\omega\cdot t$ із системи рівнянь (5) одержимо закон руху центра стрижня в проекціях на осі координат:

$$\begin{cases}x_c=0;\\ y_c=\dfrac{R\cdot\cos\alpha\cdot\sin(\omega\cdot t)}{\sqrt{\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha+\cos^2(\omega\cdot t)}};\\ z_c=\pm\dfrac{R\cdot\sin\alpha}{\sqrt{\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha+\cos^2(\omega\cdot t)}}.\end{cases}\tag{6}$$

Проекції швидкості стрижня V_{xc}, V_{yc}, V_{zc} знайдемо із (6), продиференціювавши почасові *t* координати x_c, y_c, z_c. В результаті одержимо

$$\begin{cases}v_{xc}=\dfrac{dx_c}{dt}=0;\\ v_{yc}=\dfrac{dy_c}{dt}=R\cdot\omega\cdot\dfrac{\cos(\omega\cdot t)\cdot\cos\alpha\cdot\sin^2\alpha}{(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{1,5}};\\ v_{zc}=\dfrac{dz_c}{dt}=-0,5\cdot R\cdot\omega\cdot\dfrac{\sin(2\cdot\omega\cdot t)\cdot\sin\alpha\cdot\cos^2\alpha}{(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{1,5}}.\end{cases}\tag{7}$$

Модуль швидкості центра шарика буде

$$v_c=\sqrt{v_{xc}^2+v_{yc}^2+v_{zc}^2}=0,5\cdot\omega\cdot R\cdot\frac{\sin(2\cdot\alpha)\cdot|\cos(\omega\cdot t)|}{\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t)}.\tag{8}$$

Для знаходження проекцій прискорення центра стрижня W_{xc}, W_{yc}, W_{zc} на осі координат продиференціюємо вирази (7) для проекцій швидкостей. Одержимо

$$\begin{cases}w_{xc}=\dfrac{dv_{xc}}{dt}=0;\\ w_{yc}=\dfrac{dv_{yc}}{dt}=-\dfrac{R\cdot\omega^2\cdot\sin^2\alpha\cdot\cos\alpha\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot(1+2\cdot\cos^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))}{(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{2,5}};\\ w_{zc}=\dfrac{dv_{zc}}{dt}=-\dfrac{R\cdot\omega\cdot\sin\alpha\cdot\cos^2\alpha\cdot\cos(2\cdot\omega\cdot t)}{(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{2,5}}+\dfrac{\cos^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t)+0,25\cdot\cos^2\alpha\cdot\sin^2(2\cdot\omega\cdot t)}{(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{2,5}}.\end{cases}\tag{9}$$

Тоді модуль прискорення центра шарика буде

$$\begin{aligned}w_c=\sqrt{w_{xc}^2+w_{yc}^2+w_{zc}^2}&=\frac{R\cdot\omega^2\cdot\sin(2\cdot\alpha)}{2\cdot(\sin^2(\omega\cdot t)+\sin^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^{2,5}}\times\\ &\times\Big[\cos^2\alpha\cdot\Big[\cos(2\cdot\omega\cdot t)-\cos^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t)\cdot(1+\sin^2(\omega\cdot t))\Big]^2+\\ &+\sin^2\alpha\cdot\sin^2(\omega\cdot t)\cdot(1+2\cdot\cos^2\alpha\cdot\cos^2(\omega\cdot t))^2\Big]^{0,5}.\end{aligned}\tag{10}$$

Кутову швидкість обойми ω_o знайдемо за формулою

$$\omega_o = \frac{v_c}{R} = 0,5 \cdot \omega \cdot \frac{\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}. \quad (11)$$

Кутове прискорення обойми ε_o відшукаємо, як першу похідну від кутової швидкості ω_o

$$\varepsilon_o = (\omega_o) = \frac{d\omega_o}{dt} = -\frac{0,5 \cdot \omega^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}. \quad (12)$$

Знайдемо шлях, пройдений центром стрижня за час t

$$S_c = \int_0^t v_o \cdot dt = \int_0^t \frac{0,5 \cdot R \cdot \omega \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2(\omega \cdot t)} \cdot dt = \quad (13)$$
$$= R \cdot \arctan(\mathrm{c}\tan \alpha \cdot \sin(\omega \cdot t)).$$

З рівнянь (9)–(11) видно, що величини кутової швидкості, шляху та прискорення стрижня прямо пропорційні величині радіуса повзуна R_n і змінюються за тригонометричними законами залежно від кута нахилу α підшипника 4 до осі вала 2 і кута повороту φ вала при його постійній кутовій швидкості ω.

Аналітичне дослідження кінематики механізмів зручно вести з використанням аналогів швидкостей і прискорень, які вперше були використані Ассуром [9]. Це пояснюється тим, що для заданої кінематичної схеми механізму аналоги швидкостей і прискорень залежать тільки від узагальненої координати і не залежать від швидкості руху початкової ланки, тобто кінематичне дослідження можна провадити суто геометричними методами. Крім цього, що дуже важливо, аналоги швидкостей і прискорень дають змогу легко порівнювати закони руху ланок, а звідси й вибрати оптимальний варіант механізму для забезпечення заданих умов роботи.

Узагальненою координатою, як правило, вибирають переміщення початкової ланки (кут φ_1 повороту кривошипа або лінійне переміщення s_1 повзуна). З (11) слідує, що аналог кутової швидкості обойми:

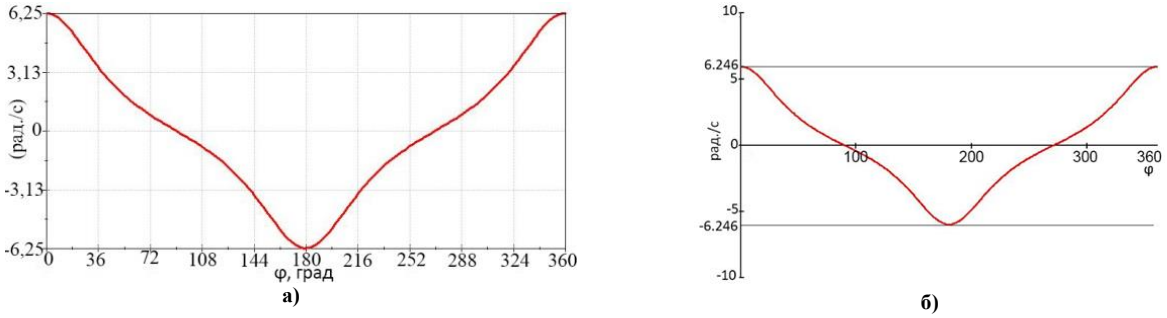
$$\varphi'_o = \frac{0,5 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos \varphi}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi} = \frac{\tan \alpha \cdot \cos \varphi}{\tan^2 \alpha + \sin^2 \varphi}. \quad (14)$$

Аналог кутового прискорення обойми буде:

$$\varphi''_o = \frac{d\omega_o}{t\varphi} = -0,5 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos \varphi \frac{1 + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}{(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi)^2}. \quad (15)$$

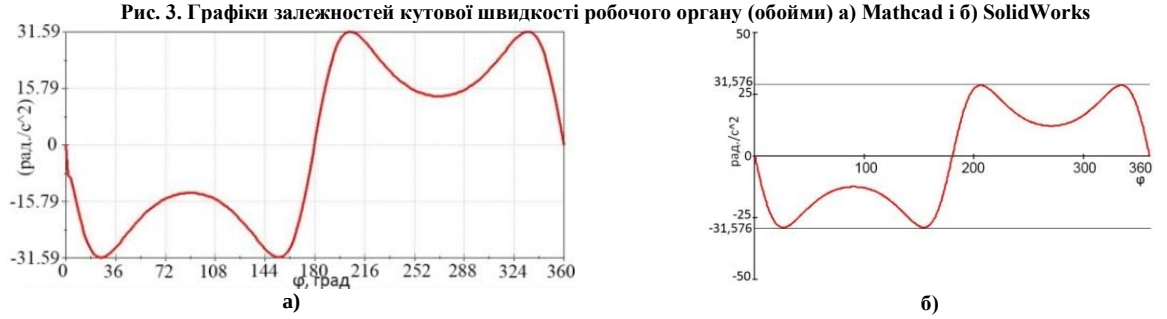
Під час проектування реальних машин важливо знати дійсні величини швидкостей та прискорень ланок механізму. Для визначення кутової швидкості і кутового прискорення робочого органу (обойми) при заданій кутовій швидкості ω вала 1 (рис. 1) використовуємо наступні залежності [5]: $\omega_o = \varphi'_o \omega$, де φ'_o – аналог кутової швидкості обойми; $\varepsilon_o = \varphi''_o \omega^2$, де – φ''_o аналог кутового прискорення обойми.

Отримано графіки залежностей кутової швидкості та прискорення робочого органу (обойми) перетворювача руху в програмах Mathcad і SolidWorks, які наведені на рис. 3 і 4.



а) б)

Рис. 3. Графіки залежностей кутової швидкості робочого органу (обойми) а) Mathcad і б) SolidWorks



а) б)

Рис. 4. Графіки залежностей кутового прискорення робочого органу (обойми) в а) Mathcad і б) SolidWorks

Для прикладу, в табл. 1 і 2 наведені максимальні значення кутових швидкостей робочого органу (обойми), одержані при різних частотах обертання вала 1. Кут між площиною симетрії кільцевого паза кривошипа 3 і геометричною віссю вала 1 α = 40°.

Таблиця 1

Максимальні значення кутових швидкостей робочого органу (обойми)

Частота обертання вала, об./хв.	50	150	250	500
Mathcad, рад./с	6,24608	18,72632	31,20656	62,41312
SolidWorks Moution, рад./с	6,248287	18,70996	31,18908	62,3607
Похибка, %	0,035328	0,087387	0,056023	0,083988

Таблиця 2

Максимальні значення кутового прискорення робочого органу (обойми)

Частота обертання вала, об./хв.	50	150	250	500
Mathcad, рад./с^2	31,57624	283,8247	788,2013	3152,805
SolidWorks Moution, рад./с^2	31,5905	283,7909	788,314	3106,394
Похибка, %	0,045151	0,011903	0,0143	1,472066

Кінематичні дослідження оборотного перетворювача напрямку руху на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму показали, що кутові прискорення робочого органу (обойми) в крайніх положеннях малі. Це є позитивною властивістю механізму, що розглядаються. Обойма плавно підходить до упора і різко розганяється в місцях, близьких до середнього положення обойми, де виникає максимальна кутова швидкість. Такий режим коливання робочого органу (обойми) не вимагає установки гальм при підході до перегородки (упорам). Оборотний перетворювач напрямку руху на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму можна виготовляти з використанням відомих у промисловості матеріалів, устаткування й інструментів. Він може використовуватися у різних галузях і виконувати різні функції, зокрема, як виконавчий механізм компресорів, насосів, пневмо- і гідромоторів, а також у складі трансмісій інших пристроїв.

Висновки

Розглянуті структура та принцип роботи оборотного перетворювача напрямку руху на основі сферичного кривошипно-повзунного механізму. Отримано математичну модель, яка дозволили виконати аналітичне дослідження кінематики механізму з використанням програми Mathcad. Проведено комп'ютерне моделювання вказаного механізму у програмі SolidWorks з використанням системи інженерного аналізу SolidWorks Motion. Наведено результати кінематичного дослідження у вигляді таблиць та графіків. Порівняння результатів розрахунків математичної моделі і спроектованої 3D-моделі механізму підтверджують їх відповідність. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу механізму за різними критеріями, що важливо для його практичного використання.

Література

1. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике : пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей : в 7 т. / Артоболевский И. И. – М. : Наука, 1979–1981.
2. Патент RUS № 56501. Роторно-лопастной компрессор / Коломин И.В., Довгялло А.И., Семенов Б.П., Русанов Ю.М., Трубников Ю.М. – 2006, Бюл. № 23.
3. Патент RUS № 2133833. Обратимый преобразователь направления движения и машина объемного вытеснения на его основе / Бельдий Н.Н., Бельдий В.Н. – 27.07.1999.
4. Патент RUS № 2244163. Сферический кривошипно-ползунный механизм (варианты) / Притула М.М., Травников Е. Н., Колищук В. В. – 2005, Бюл. 1.
5. Кінницький Я. Т. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad : навчальний посібник / Кінницький Я. Т., Харжевський В. О., Марченко М. В. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2014. – 324 с.
6. Бертяев В.Д. Теоретическая механика на базе Mathcad : практикум / Бертяев В.Д. – СПб : БХВ – Петербург, 2005. – 762 с.
7. Бельдій М.М. Кінематика зворотного перетворювача напрямку руху / М.М. Бельдій, Я.Т. Кіницький, Г.П. Черменський // Вісн. Технол. ун-ту Поділля. – 2000. – № 3. – С. 7–13.
8. Кінницький Я.Т. Теорія механізмів і машин / Кінницький Я.Т. – К. : Наукова думка, 2002. – 660 с.
9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / Артоболевский И.И. – М. : Наука, 1988. – 640 с.

References

1. Artobolevskij I. I. Mehanizmy v sovremennoj tehnike : posobie dlya inzhenerov, konstruktorov i izobretatelej : v 7 t. / Artobolevskij I. I. – M. : Nauka, 1979–1981.
2. Patent RUS № 56501. Rotorno-lopastnoj kompressor / Kolomin I.V., Dovgyallo A.I., Semenov B.P., Rusanov Yu.M., Trubnikov Yu.M. – 2006, Byul. № 23.
3. Patent RUS № 2133833. Obratimyj preobrazovatel napravleniya dvizheniya i mashina obemnogo vytesneniya na ego osnove / Beldij N.N., Beldij V.N. – 27.07.1999.
4. Patent RUS № 2244163. Sfericheskij krivoshipno-polzunnyj mehanizm (varianty) / Pritula M.M., Travnikov E. N., Kolishuk V. V. – 2005, Byul. 1.
5. Kinnytskyi Ya. T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn v systemi Mathcad : navchalnyi posibnyk / Kinnytskyi Ya. T., Kharzhevskyi V. O., Marchenko M. V. – Khmelnytskyi : RVTs KhNU, 2014. – 324 s.
6. Bertyaev V.D. Teoreticheskaya mehanika na baze Mathcad : praktikum / Bertyaev V.D. – SPb : BHV – Peterburg, 2005. – 762 s.
7. Beldii M.M. Kinematyka zvorotnoho peretvoriuvacha napriamku rukhu / M.M. Beldii, Ya.T. Kinytskyi, H.P. Chermenskyi // Visn. Tekhnol. un-tu Podillia. – 2000. – № 3. – S. 7–13.
8. Kinnytskyi Ya.T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn / Kinnytskyi Ya.T. – K. : Naukova dumka, 2002. – 660 s.
9. Artobolevskyi Y.Y. Teoryia mekhanyzmov y mashyn / Artobolevskyi Y.Y. – M. : Nauka, 1988. – 640 s.

Рецензія/Peer review : 7.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Гордеєв А.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-12-15
УДК 621.777.4

Ю.В. САВИЦЬКИЙ, О.А. ГОРДЄЄВ
Хмельницький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГЛИБОКОГО ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТОЧНИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «СТАКАН». ЧАСТИНА 2

У роботі розглянуті методи комп'ютерного моделювання процесу холодного видавлювання металів на основі програмного продукту DEFORM-3D. Розроблена комп'ютерна модель імітації процесу холодного штампування, яка дає змогу прогнозувати працездатність штампової оснастки в імітаційному режимі без застосування високовартісних методів натурних досліджень штампів. Запропонована конфігурація заготовки була проаналізована в DEFORM-3D під час імітації процесу холодного видавлювання. В результаті комп'ютерного моделювання з'ясувалося, що максимальне зусилля, яке виникає в запропонованій заготовці, менше, процес перетікання металу проходить більш плавно та з меншими навантаженням порівняно із заготовкою по технологічному процесу. В ході порівняння отриманих результатів досліджень отримані висновки про те, що зміна форми заготовки покращує роботу штампа, а саме зменшує навантаження на робочий інструмент, що забезпечує належну роботу штампа та усуває поломку робочого інструмента пуансона.

Ключові слова: штампування, деформації, холодне видавлювання, DEFORM-3D, моделювання.

Y.V. SAVITSKY, O.A. HORDEEV
Khmelnytskyi National University

USE OF DEFINITIONAL COLD PRESSURE TECHNOLOGY TO OBTAIN ACCURATE BLENDS OF DETAILS OF TYPE OF GLASS. PART 2

The methods of computer modelling of cold extrusion of metal based on DEFORM-3D software are considered. A computer model for simulating cold stamping was developed to predict the workability of stamping equipment in simulation mode without the use of high-quality methods of full-blown stamp studies. The proposed work piece configuration was analysed in DEFORM-3D by simulating the cold extrusion process. As a result of computer simulation, it has been found that the maximum effort that occurs in the proposed work piece is less, the process of metal flow is smoother and with less workload than the work piece process. When comparing the results of the studies, we conclude that changing the shape of the work piece improves the work of the stamp, namely, reduces the load on the work tool, which ensures the proper work of the die and eliminates the breakage of the working tool punches. A real-life example of manufacturing detail is a computer simulation technique that helps reduce manufacturing costs by simulating the process.

Keywords: stamping, deformation, cold extrusion, DEFORM-3D, modelling.

Постановка проблеми

DEFORM-3D є системою скінченно елементного моделювання, яка призначена для аналізу тривимірного (3D) перетікання металу під час різних процесів обробки металів тиском. DEFORM-3D – практичний і ефективний інструмент, який дозволяє прогнозувати характер формування в ході операцій обробки металів тиском без витрат на експериментальне дослідження [1]. Операції моделювання, доступні в DEFORM-3D: кування; видавлювання; протягування; механообробна; висаджування; пресування; прокатування; витягування; осаджування. Заснований на методі скінчених елементів, програмний продукт DEFORM-3D довів свою ефективність і точність більше ніж двадцятилітнім застосуванням на різних підприємствах. Потужний вирішувач системи може аналізувати перетікання металу і температурні показники заготовки та інструменту під час деформацій будь-якої величини з дуже високою точністю.

Автоматичний генератор сіток дозволяє побудувати сітку скінчених елементів, розміри яких в різних частинах моделі будуть розрізнятись залежно від специфіки аналізованого процесу. Це суттєво зменшує загальну розмірність задачі і вимог до апаратних засобів. Крім того, користувач системи DEFORM-3D має можливість в "ручному" режимі налаштовувати сітки і співвідношення режимів скінчених елементів [2]. Не дивлячись на те, що DEFORM-3D дозволяє моделювати дуже складні процеси, інтерфейс цієї системи простий і легкий в освоєнні, дозволяє будувати геометричні моделі заготовок та інструменту.

За допомогою системи DEFORM-3D можна моделювати роздільні операції і механічну обробку. DEFORM-3D широко застосовується у виробництві і науково-дослідницькій діяльності по всьому світу.

Розробку і технічну підтримку системи DEFORM-3D здійснила фірма Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), протягом багатьох років, фірма займалась впровадженням засобів моделювання технологічних процесів у виробництво.

Виклад основного матеріалу

Працездатність штампа можливо дослідити за допомогою спеціалізованого програмного продукту DEFORM-3D. Для дослідження в DEFORM-3D необхідно створити за допомогою іншого програмного продукту 3D модель. В даному випадку було використано програмний продукт Siemens NX 9.0, який є потужним комплексом для моделювання та написання програм для верстатів з ЧПУ.

На рис. 1 та рис. 2 зображено 3D модель пуансона та матриці в зборі.

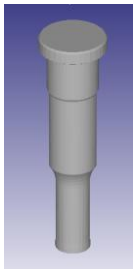


Рис. 1. 3D модель пуансона

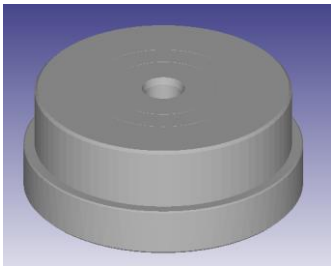


Рис. 2. 3D модель матриці в зборі

Після того як моделі створені, завантажується програмний продукт, створюється нова задача та відповідно завантажуються моделі. При роботі в DEFORM-3D потрібно задати необхідні параметри, деякі з них: пластичність матеріалу заготовки; матеріал заготовки; твердість матеріалу робочого інструменту; співвісність заготовки відносно робочого інструменту; вказати головний інструмент; напрям руху інструменту; робочий хід інструменту; компенсація об'єму заготовки; розміри сітки.

Після завдання всіх параметрів запускається процес обробки даних, який займає певний час. Після обробки даних програмою є можливість завантажити постпроцесор та побачити рух інструменту та деформацію заготовки, також за отриманими результатами у вигляді графіків побачити поведінку матеріалу.

Базуючись на попередньому аналізі процесу холодного видавлювання [3, 4] для зменшення зусилля обробки було запропоновано ввести додаткову операцію обробки заготовки, яка змінить форму заготовки (рис. 3). Після додаткової операції заготовку встановили на штамп.

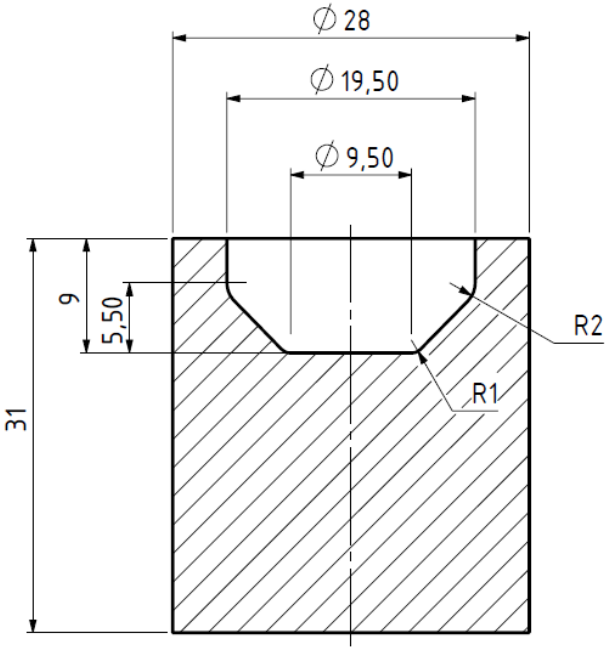


Рис. 3. Креслення запропонованої заготовки

Порівняльні результати аналізу працездатності штампа за допомогою DEFORM-3D представлені в вигляді порівняння видавлювання двох заготовок: зліва – використання заготовки заводської форми, справа – використання заготовки запропонованої форми (рис. 3).

Діаграму зусиль, які виникають в заготовці під час обробки, зображено на рис. 4.

Рис. 4. Діаграма зусиль, які виникають в заготовці під час обробки

Залежність навантаження прикладеної сили пуансона на заготовку від часу зображено на рис. 5.

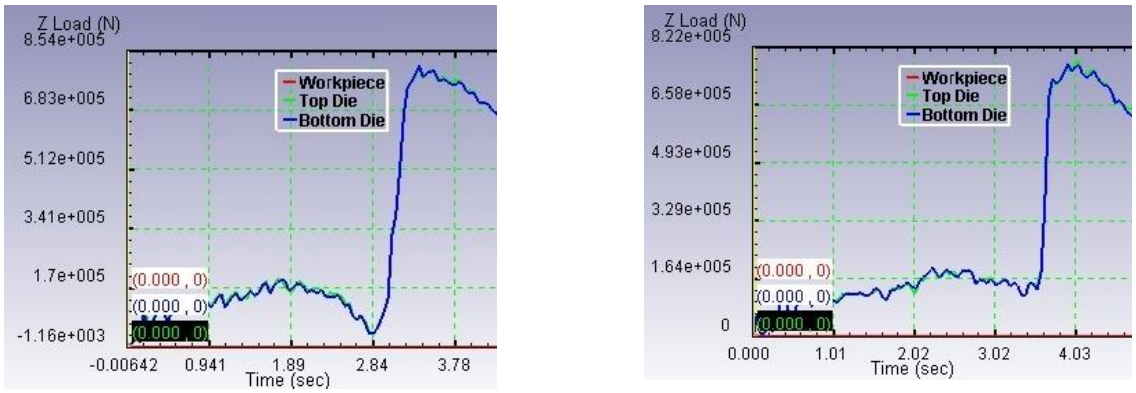


Рис. 5. Графічна залежність прикладеної сили пуансона на заготовку від часу

Залежність середньоістинного навантаження пуансона на заготовку від часу зображено на рис. 6.

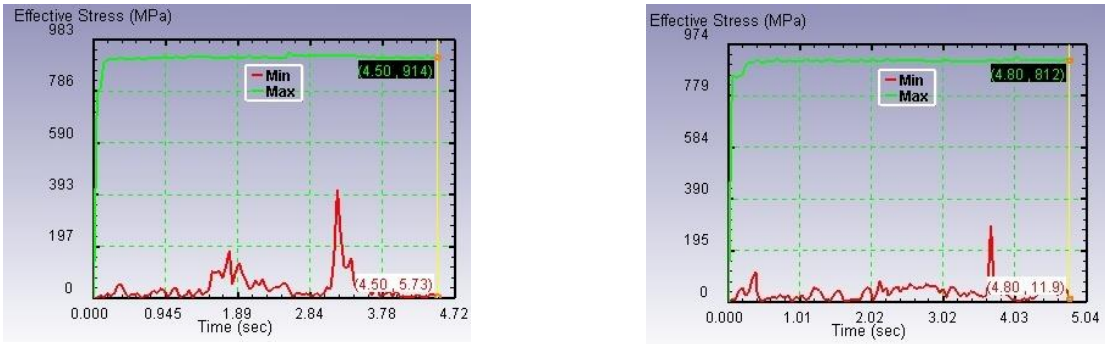


Рис. 6. Графічна залежність середньоістинного навантаження пуансона на заготовку від часу

Залежність середнього напруження в заготовці від часу зображено на рис. 7.

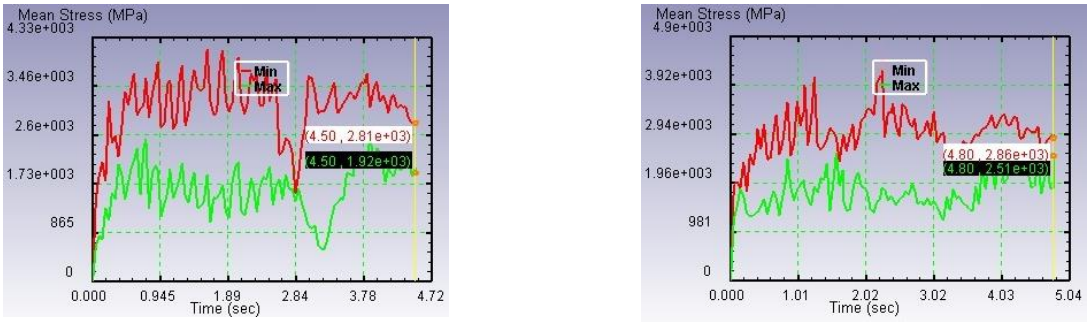


Рис. 7. Графічна залежність середнього напруження в заготовці від часу

Залежності максимального головного напруження в заготовці від часу зображено на рис. 8.

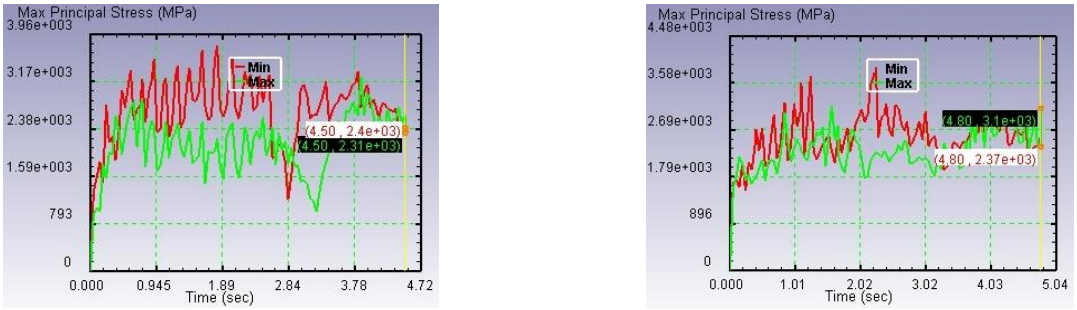


Рис. 8. Графічне зображення залежності максимального головного напруження в заготовці від часу

За отриманими результатами в DEFORM-3D є можливість виконати дослідження навантаження на інструмент, а саме на пуансон за допомогою SolidWorks Simulation. За допомогою DEFORM-3D отримані навантаження на заготовку, які мають такі максимальні значення: для заготовки по технологічному процесу – 936 МПа; для запропонованої заготовки – 860 МПа. Ці значення навантажень і слугуватимуть даними для обробки в Solid Works Simulation. Отримані результати: в лівій стороні рисунка представлені результати для заготовки по технологічному процесу, а в правій – для запропонованої заготовки. Діаграма напруження зображена на рис. 9. Після проведених досліджень за допомого спеціалізованих програмних продуктів, таких як DEFORM-3D та Solid Works Simulation, отримані результати розрахунків, за допомогою яких можна зробити порівняльні висновки.

Порівняння результатів отриманих в DEFORM-3D

З перших отриманих діаграм зусиль, які виникають в заготовці під час обробки (рис. 4), видно, що у запропонованому варіанті максимальне зусилля, яке виникає в заготовці, менше на 936-860=76 МПа. Під час порівняння графічних залежностей прикладеної сили пуансона на заготовку від часу (рис. 5) помітно, що процес перетікання металу є більш помірним в запропонованому варіанті [5]. По третьому результату залежності середньоістинного навантаження пуансона на заготовку від часу (рис. 6) свідчать, що процес проходить більш плавно та з меншим навантаженням. З графічної залежності напруження в заготовці від часу (рис. 7) видно, що процес проходить краще в запропонованому варіанті з меншим навантаженням. При порівняні зображень залежності максимального головного напруження в заготовці від часу (рис. 8) максимальне навантаження в запропонованому варіанті заготовки менше ніж в заготовці по технологічному процесу та процес перетікання металу в запропонованій заготовці проходить більш помірніше, без великих перепадів [6, 7].

Порівняння результатів отриманих в Solid Works Simulation

В Solid Works Simulation було досліджено пуансон, так як він несе найбільше навантаження. За допомогою отриманих результатів в DEFORM-3D ми провели порівняння, які дали відповідні результати.

Після порівняння видно, що напруження в пуансоні (рис. 9) під час обробки заготовки відповідно до технологічного процесу більші ніж під час обробки по запропонованому процесу (von Mises 8133505 та 8031583). Порівняння діаграм переміщень показали, що в ході обробки запропонованої заготовки переміщення менші (URES 3,205 та 2,950). Деформація пуансона при зміненій заготовці зменшується (ESTRN 3,082 та 2,883).

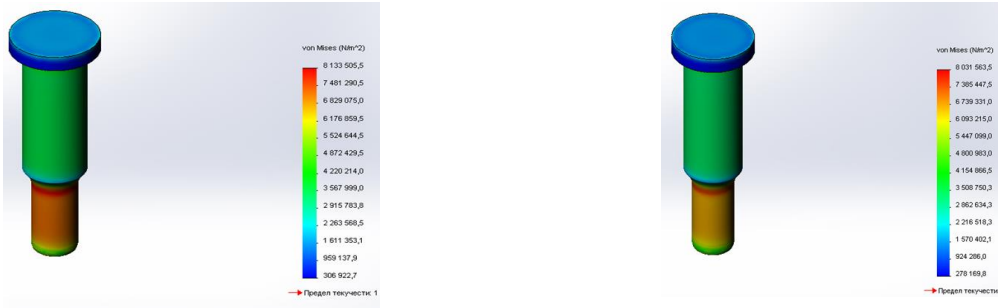


Рис. 9. Діаграма напруження

Висновки

У роботі були розглянуті методи комп'ютерного моделювання процесу холодного видавлювання металів на основі програмного продукту DEFORM-3D. Розроблена комп'ютерна модель імітації процесу холодного штампування, яка дає змогу прогнозувати працездатність штампової оснастки в імітаційному режимі без застосування високовартісних методів натурних досліджень штампів. Запропонована конфігурація заготовки була проаналізована в DEFORM-3D при імітації процесу холодного видавлювання. В результаті комп'ютерного моделювання з'ясувалося, що максимальне зусилля, яке виникає в запропонованій заготовці менше, процес перетікання металу проходить більш плавно та з меншим навантаженням порівняно із заготовкою по технологічному процесу. Під час порівняння отриманих результатів досліджень отримані висновки, що зміна форми заготовки покращує роботу штампа, а саме зменшує навантаження на робочий інструмент, що забезпечує належну роботу штампа та усуває поломку робочого інструмента пуансона.

Література

1. Shao Ran, Xu Kan. Study on blade forging die design based on deform-3D. Hot Working Technology, Vol. 43, Issue 5, 2014, p. 148–150.

2. Zou Qiong Qiong, Huang Ji Long, Gong Hong Ying, et al. Optimization of cold extrusion for automobile spline shaft parts based on deform-3D. Journal of Plastic Engineering, Vol. 23, Issue 5, 2016, p. 8–13.

3. Воронцов А.Л. Теория штамповки выдавливанием / А. Л. Воронцов. – М., 2004. – 721 с.

4. Холодная объемная штамповка / под ред. Г.А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1987. – 384 с.

5. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.

6. Кротенко Г. А. Аналіз процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу / Кротенко Г. А. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – 20 с.

7. Бэкофен В. Процессы деформации / Бэкофен В. ; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1987. – 208 с.

References

1. Shao Ran, Xu Kan. Study on blade forging die design based on deform-3D. Hot Working Technology, Vol. 43, Issue 5, 2014, p. 148–150.

2. Zou Qiong Qiong, Huang Ji Long, Gong Hong Ying, et al. Optimization of cold extrusion for automobile spline shaft parts based on deform-3D. Journal of Plastic Engineering, Vol. 23, Issue 5, 2016, p. 8–13.

3. Vorontsov A.L. Theory of extrusion stamping. M.: Mechanical Engineering 1, 2004. 721 p.

4. Cold forging; ed. G.A. Navrotskogo. M.: Mashinostroenie, 1987. 384 p.

5. The theory of plastic deformation of metals; ed. E.P. Unksova, A.G. Ovchinnikov. M.: Mashinos-MAKING, 1983. 598 p.

6. Krotenko G.A. Analysis of extrusion processes in terms of three-dimensional metal flow. NTU "KhPI". Kharkiv, 2011. 20 p.

7. Bakofen V. Deformation processes. Trans. with English. M.: Metallurgy, 1987. 208 p.

Рецензія/Peer review : 27.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Гордєєв А.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-16-19
УДК 621.86

О.О. НЕМЧУК, В.В. СТРЕЛЬБІЦЬКИЙ
Одеський національний морський університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАПРАЦЮВАННЯ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Об'єктом дослідження є портальні крани, котрі відпрацювали нормативний термін та експлуатуються в річкових портах. Понаднормова та тривала їх експлуатація в режимі інтенсивного циклічного навантаження та в сукупності зі зміною фізико-механічних властивостей внаслідок корозійної деградації металу загострює проблему зниження їх працездатності. За умов відсутності достатнього фінансування актуальною задачею є встановлення ресурсу кранів, що визначається опірністю втомного руйнування портальних кранів. Метою роботи є встановлення впливу напрацювання в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій портальних кранів. Для досліджень були використані плоскі зразки, виготовлені зі сталі St38b2, які вирізані з нижньої та задньої полиць хобота, а також стріли портальних кранів типу «Альбатрос», що напрацювали 28, 36 і 45 роки в Херсонському порту. Експериментальні зразки навантажували плоским згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження, частотою 16 Гц, асиметрією циклу R 0,05. З отриманих експериментальних кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалу видно, що збільшення напрацювання призводить до інтенсифікації росту тріщини на низько- та середньоамплітудних ділянках, зокрема в діапазоні значень К=12…30 МПа·м$^{1/2}$ швидкість збільшується у 1,5-2 рази. Однак в межах високоамплітудної ділянки розбіжності між швидкостями незначні, що узгоджується з даними, наведеними в літературних джерелах [5, 13].

Ключові слова: портальний кран, корозія, сталь St38b2, швидкість росту втомної тріщини.

O.O. NEMMCHUK, V.V. STRELBITSKIY
Odessa National Maritime University

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE IMPACT OF AGE ON THE CRACK RESISTANCE OF THE PORTAL CRANES

The subject of the study are portal cranes, which have fulfilled the regulatory deadline and are operated in river ports. Overtime and their long operation in the mode of intensive cyclic loading and in combination with the change of physical and mechanical properties due to corrosion degradation of the metal exacerbates the problem of reducing their efficiency. In the absence of sufficient funding, the urgent task is to install a cranes resource, which is determined by the fatigue resistance of portal cranes. The aim of the work is to establish the influence of operating time in an aggressive environment on the fracture toughness characteristics of metal structures of portal cranes. Flat beam specimens with one-sided incision were used for the studies. They are made of sheet low-carbon ferrite-pearlite grade St38b2 steel (similar to St3sp), and are carved from the bottom and back shelves of the trunk, as well as the right wall of the column of portal cranes of the Albatross type, operated for 28, 36 and 45 years in the port of Kherson. The number of samples from each element is 10. The cut-outs of the samples were chosen taking into account the scheme of the acting stresses in the designs of the crane elements. The flat specimens were loaded with a cantilever bend on a rigid load type test machine with a frequency of 16 Hz, with a cycle asymmetry of 0.05 (close to the sinusoidal shape of the cycle) and an ambient air temperature of 20ºC. The values obtained were averaged for each sample group. The results of the experimental studies show that: 1) absorbs the experience of gantry cranes on the characteristics of the fracture toughness of St38b2 steel structures; 2) the increase of time leads to the intensification of the growth of the crack in the low- and medium-amplitude sections, in particular in the range of values K = 12… 30 MPa · m1 / 2 the velocity increases in 1.5-2 times. However. within the high-amplitude region, the differences between the velocities are insignificant;3) the characteristics of the fracture toughness of the samples of metal structures of gantry cranes with a time of 28, 36 and 45 years have not changed significantly.

Keywords: gantry crane, corrosion, St38b2 steel, fatigue crack growth rate.

Постановка проблеми

Найбільш розповсюдженими перевантажувальними машинами річкових портів є портальні крани, за допомогою яких виконують основний об'єм розвантажувальних робіт. Від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність порту. Особливу увагу приділяють елементам металоконструкцій, так як понаднормова та тривала їх експлуатація в режимі інтенсивного циклічного навантаження та в сукупності зі зміною фізико-механічних властивостей внаслідок корозійної деградації металу загострює проблему зниження їх працездатності [1–8]. Крім того, експлуатаційне наводнення сталей призводить до інтенсифікації їх пошкоджуваності [8–12]. Небезпека корозійних пошкоджень в тому, що вони можуть слугувати концентраторами втомних тріщин. Слід зазначити, що під час їх проектування конструктори установили чималі запаси міцності. За умов відсутності достатнього фінансування актуальною задачею є встановлення ресурсу кранів, котрий визначається опірністю втомного руйнування портальних кранів.

Аналіз публікацій

Аналіз проведених досліджень [1–12] показав:

1) міцність та пластичність сталі конструкції кранів, які напрацювали більше 30 років, істотно не змінилися, зате погіршилася ударна в'язкість металу, тобто його опірність крихкому руйнуванню [1–7, 13]; тому можна припустити, що погіршиться й опір втомному руйнуванню.

2) корозійні ушкодження металевих конструкцій портальних кранів мають вигляд язв чи поверхневих ушкоджень, носять випадковий характер та істотно впливають на залишкову довговічність [1–7, 13];

3) зі збільшенням терміну служби знижуються механічні характеристики матеріалів [1, 5, 13];

4) влив напрацювання неоднозначно позначається на механічних характеристиках втоми [1–7, 13].

Метою роботи є встановлення впливу напрацювання в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій портальних кранів.

Виклад основного матеріалу

Для досліджень використані плоскі балочні зразки з одностороннім надрізом (рис. 1). Виготовлені з листової низьковуглецевої ферито-перлітного класу сталі St38b2 (аналог Ст3сп) та вирізані з нижньої та задньої полиць хобота, а також правої стріли портальних кранів типу «Альбатрос», що експлуатувалися протягом 28, 36 і 45 рр. в річковому порту Херсона. Кількість зразків з кожного елемента – по 10.

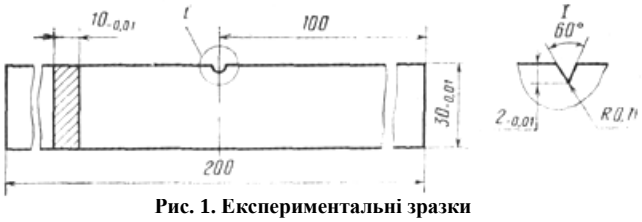


Рис. 1. Експериментальні зразки

Місця вирізання зразків вибирались з врахуванням схеми діючих напружень в конструкціях елементів крана. Для забезпечення необхідних розмірів після вирізання зразки остаточно шліфували (відхилення розмірів не перевищували ±0,02 мм). Для покращення спостерігання за рухом тріщини бокові поверхні робочої частини полірували, що дозволило за допомогою мікроскопа з точністю до 0,01 мм візуально реєструвати довжину тріщини. У процесі досліджень на заданих режимах випробувань за обома полірованими бічними поверхнями зразків періодично вимірювали довжину тріщини. При цьому фіксувалося відповідне число циклів. Плоскі зразки навантажували консольним згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження, частотою 16 Гц, за асиметрії циклу R 0,05 (наближена до синусоїдальної форми циклу) та температури зовнішнього повітря 20ºС.

Отримані значення усереднювали для кожної групи зразків. За отриманими даними будували кінетичні діаграми втомного руйнування «максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) *Kmax* – швидкість росту тріщини *da/dN*» (рис. 2) за методикою [5].

Так як товщини зразків для випробувань на циклічну тріщиностійкість і металевих конструкцій однакові, то з певною ймовірністю можна припустити, що і швидкості росту тріщини для даного мають бути наближені. Це дозволяє використовувати отримані кінетичні діаграми для проведення інженерних розрахунків на довговічність на стадії проектування. Під час досліджень 2 зразки передчасно вийшли з ладу внаслідок прихованих дефектів в металі, крім того на 10 зразках спостерігалося сповільнення швидкості розповсюдження тріщини.

За отриманими експериментальними даними розраховували коефіцієнти *C* і n, характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу на ділянці Періса, за залежністю (1); результати наведені в табл. 1:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n. \quad (1)$$

Як показав аналіз зразків металоконструкцій корозійні ушкодження проявляються у вигляді язв та поверхневих дефектів. Металографічний аналіз, проведений за допомогою оптичного мікроскопу, показав відсутність міжкристалічної корозії.

За заданої асиметрії циклу експлуатація сталі не вплинула на швидкість росту втомної тріщини.

З отриманих експериментальних кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалу встановлено, що збільшення напрацювання призводить до інтенсифікації росту тріщини на низько- та середньоамплітудних ділянках, зокрема в діапазоні значень *Kmax*=12…30 МПа·м$^{1/2}$ швидкість збільшується у 1,5-2 рази. Однак в межах низько- та високоамплітудної ділянки розбіжності між швидкостями незначні, що узгоджується з даними наведеними в літературних джерелах [5, 13].

Таблиця 1

Характеристики циклічної тріщиностійкості зразків з сталі St38b2

Елемент крана	Напрацювання, р.	Характеристики циклічної тріщиностійкості		Коефіцієнт кореляції
		C	*n*	
Хобот	28	$6{,}12\cdot10^{-12}$	2,76	0,97
	36	$8{,}5\cdot10^{-12}$	2,74	0,96
	45	$1{,}4\cdot10^{-11}$	2,67	0,98
Стріла	28	$5{,}81\cdot10^{-12}$	2,84	0,97
	36	$8{,}46\cdot10^{-12}$	2,79	0,96
	45	$1{,}07\cdot10^{-11}$	2,81	0,98

Висновки

За отриманими результатами експериментальних досліджень видно:

1) на характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій зі сталі St38b2 впиває напрацювання портальних кранів;

2) збільшення напрацювання призводить до інтенсифікації росту тріщини на низько- та середньоамплітудних ділянках, зокрема в діапазоні значень *K*=12…30 МПа·м$^{1/2}$ швидкість збільшується у 1,5-2 рази.. Однак в межах високоамплітудної ділянки розбіжності між швидкостями незначні;

3) характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій портальних кранів з напрацюванням 28, 36 і 45 років змінились не суттєво.

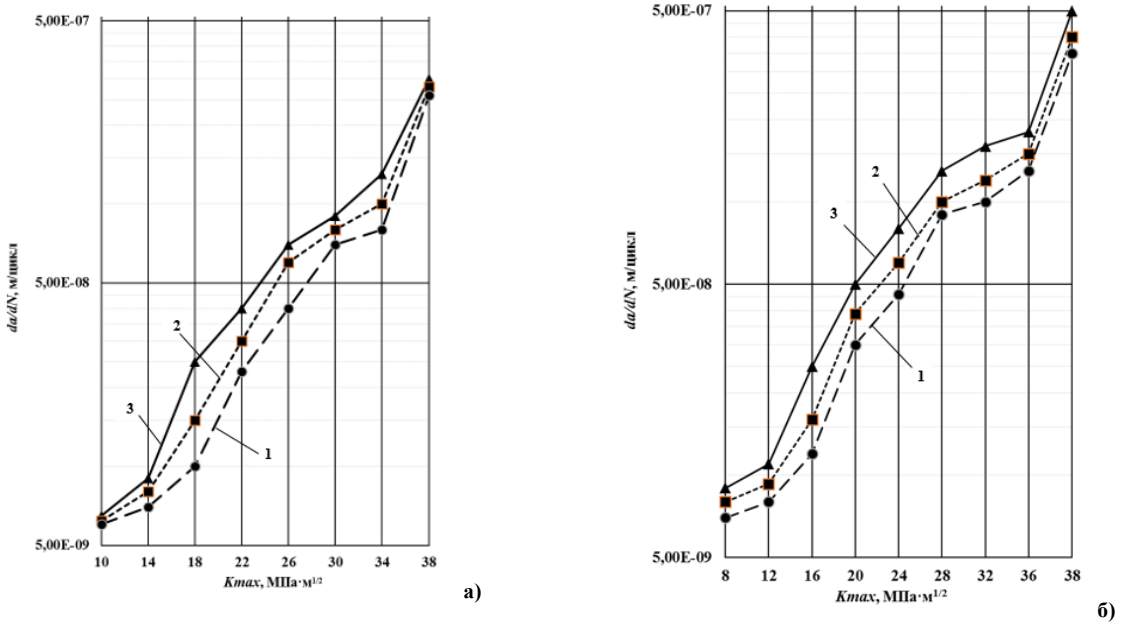


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного руйнування зразків з сталі St38b2, вирізаних з хоботу (а) та стріли (б), що напрацювали 28 (1), 33 (2) та 45 (3) рр.

Література

1. Рещенко І. О. Деградація розрахункових металоконструкцій портальних кранів в умовах тривалої наднормативної експлуатації / І. О. Рещенко, Ю.В. Фуртатов // Машинознавство. – 2011. – № 9 – 10. – С. 36–40.
2. Немчук О. О. Особливості діагностування технічного стану сталей портового перевантажувального обладнання / О. О. Немчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 6. – С. 116–118.
3. Немчук О. О. Вплив експлуатаційного навантаження на корозійну тривкість сталі морського портального крана / О. О. Немчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – № 5. – С. 121–125.
4. Немчук А. О. Определение остаточного ресурса металлоконструкций козлового крана / А. О. Немчук, М. А. Стариков // Тр. Одесск. политехн. ун-та. – 2008. – Вып. 2 (30). – С. 36–39.
5. Ботвина Л.Р. Высокоцикловое усталостное разрушение малоуглеродистой стали после её длительного старения / Л.Р. Ботвина, И.М. Петрова, И.В. Гадолина, В.П. Левин, Ю.А. Демина, А.П. Солдатенков, М.Р. Тютин // Заводская лаборатория «Диагностика материалов». – 2009. – № 6. Том 75. – С. 44–51.
6. Рещенко І.О. Вплив попереднього деформування сталей вантажних портових конструкцій на їх експлуатаційні властивості / І.О. Рещенко, Ю.В. Фуртатов // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк : ЛНТУ, 2011. – Вип. 32. – С. 339–343.
7. Харченко Л. Є. Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 4. – С. 84–90.
8. Omura T. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion / T. Omura, T. Kudo, S.Fujimoto // Mat. Transactions. – 2006. – 47, № 12. – P. 2956–2962.
9. Никифорчин Г. М. Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь // Проблемы прочности. – 2009. – 41, № 5 (401). – С. 66–72.
10. Крижанівський Є. І. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.
11. Никифорчин Г. М. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних сталей “в об’ємі” за дії агресивних середовищ / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник // Проблемы прочности. – 2009. – 41, № 6 (402). – С. 79–94.
12. Цирульник О. Т. Деградація властивостей металу зварного з’єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 5. – С. 55–58.
13. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В. Н. Пустовой. – М. : Транспорт, 1992. – 256 с.

References

1. Reshchenko I. O. Dehradatsiia rozrakhunkovykh metalokonstruktsii portalnykh kraniv v umovakh tryvaloi nadnormatyvnoi ekspluatatsii / I. O. Reshchenko, Yu.V. Furtatov // Mashynoznavstvo. – 2011. – № 9 – 10. – S. 36–40.

2. Nemchuk O. O. Osoblyvosti diahnostuvannia tekhnichnoho stanu stalei portovoho perevantazhuvalnoho obladnannia / O. O. Nemchuk // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2017. – 53, № 6. – S. 116–118.

3. Nemchuk O. O. Vplyv ekspluatatsiinoho navantazhennia na koroziinu tryvkist stali morskoho portalnoho krana / O. O. Nemchuk // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2018. – № 5. – S. 121–125.

4. Nemchuk A. O. Opredelenye ostatochnoho resursa metallokonstruktsyi kozlovoho krana / A. O. Nemchuk, M. A. Starykov // Tr. Odessk. polytekhn. un-ta. – 2008. – Vыp. 2 (30). – S. 36–39.

5. Botvyna L.R. Vыsokotsyklovoe ustalostnoe razrushenye malouhlerodystoi staly posle eё dlytelnoho starenyia / L.R. Botvyna, Y.M. Petrova, Y.V. Hadolyna, V.P. Levyn, Yu.A. Demyna, A.P. Soldatenkov, M.R. Tiutyn // Zavodskaia laboratoryia «Dyahnostyka materyalov». – 2009. – № 6. Tom 75. – S. 44–51.

6. Reshchenko I.O. Vplyv poperednoho deformuvannia stalei vantazhnykh portovykh konstruktsii na yikh ekspluatatsiini vlastyvosti / I.O. Reshchenko, Yu.V. Furtatov // Naukovi notatky : mizhvuz. zb. – Lutsk : LNTU, 2011. – Vyp. 32. – S. 339–343.

7. Kharchenko L. Ye. Diahnostyka vodnevoho makrorozsharuvannia v stintsi hynu truby systemy mahistralnykh hazoprovodiv / L. Ye. Kharchenko, O. Ye. Kunta, O. I. Zvirko, R. S. Savula, Z. A. Duriahina // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2015. – № 4. – S. 84–90.

8. Omura T. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion / T. Omura, T. Kudo, S.Fujimoto // Mat. Transactions. – 2006. – 47, № 12. – R. 2956–2962.

9. Nykyforchyn H. M. Dehradatsiia vlastyvostei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii / H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrulnyk, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil // Problemы prochnosty. – 2009. – 41, № 5 (401). – S. 66–72.

10. Kryzhanivskyi Ye. I. Osoblyvosti koroziino-vodnevoi dehradatsii stalei naftohazoprovodiv i rezervuariv zberihannia nafty / Ye. I. Kryzhanivskyi, H. M. Nykyforchyn // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2011. – 47, № 2. – S. 11–20.

11. Nykyforchyn H. M. Osoblyvosti ekspluatatsiinoi dehradatsii konstruktsiinykh stalei "v obiemi" za dii ahresyvnykh seredovyshch / H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrulnyk // Problemы prochnosty. – 2009. – 41, № 6 (402). – S. 79–94.

12. Tsyrulnyk O. T. Dehradatsiia vlastyvostei metalu zvarnoho ziednannia ekspluatovanoho mahistralnoho hazoprovodu / O. T. Tsyrulnyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna ta in. // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2010. – 46, № 5. – C. 55–58.

13. Pustovoi V.N. Metallokonstruktsyy hruzopodъemnыkh mashyn. Razrushenye y prohnozyrovanye ostatochnoho resursa / V. N. Pustovoi. – M. : Transport, 1992. – 256 s.

Рецензія/Peer review : 8.12.2019 р. Надрукована/Printed : 22.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Місяць В.П.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-20-23
УДК 621.81

О.Г. ТИМОЩУК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА І АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ТА ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМІВ ПЕРЕТІКАННЯ ГАЗУ

На основі теорії стохастичних процесів розроблені методи розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для молекулярного та перехідного режимів перетікання газу. Результатом є створення інженерних методів розрахунку герметичності таких ущільнень, а також оцінка точності створених методів для молекулярного та перехідного режимів плину газу через них. Розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металевою) поверхнею. Досліджена залежність зведеного натікання газу від комплексу умов контактування на основі теорії стохастичних полів. Виконана оцінка похибки, яка виникає при заміні точної формули розрахунку зведеного натікання наближеною формулою. Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою зведеного натікання різняться не більше, ніж на 4 відсотки. Теоретично обґрунтовані і розроблені точні методи розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для молекулярного та перехідного режимів плину газу, що є основою для практичних розрахунків герметичності ущільнень беззмащувальних пневмокомпресорів. Натікання при перехідному режимі плину газу можна знайти на підставі значень, розрахованих для в'язкісного та молекулярного режимів плину газу через беззмащувальні циліндро-поршневі ущільнення.

Ключові слова: контакт; номінальний контактний тиск; питома площа шорсткої поверхні контакту; герметичність циліндро-поршневих ущільнень; тривалість плину газу; молекулярний та перехідний режими перетікання газу; профілограма, теорія стохастичних полів.

O.G. TYMOSHCHUK
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE ACCURACY OF ENGINEERING METHODS FOR CALCULATING THE TIGHTNESS OF GREASE-FREE CYLINDER-PISTON SEALS FOR MOLECULAR AND TRANSIENT GAS FLOW MODES

On the basis of the theory of stochastic processes, methods for calculating the tightness of grease-free cylinder-piston seals for molecular and transition modes of gas flow have been developed. The result is the creation of engineering methods for calculating the leakage (duration of gas leakage) in greaseless cylinder-piston metal-polymer seals, as well as the estimation of the accuracy of the created methods for molecular and transient modes of gas flow through greaseless cylinder-piston. The article deals with the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymer surface) with a smooth (metal) surface. The task is to develop engineering methods for calculating the tightness of grease-free cylinder-piston seals for molecular and transient modes of gas flow, as well as to analyse the accuracy of the developed methods. The dependence of the combined gas leakage on a set of contact conditions based on stochastic field theory is investigated. The estimation of the error which occurs at replacement of the exact formula of calculation of the consolidated inflow by the approximate formula is made. Values calculated by the exact and calculated summary inflow formula differ by no more than 4 percent. Precise methods for calculating the tightness of the grease-free cylinder-piston seals for the molecular and transient modes of the gas flow are theoretically substantiated and developed, which is the basis for practical calculations of the tightness of the seals of grease-free pneumatic compressors. Transient leakage gas flows can be found based on the values calculated for the viscosity and molecular modes of the gas flow through the greaseless piston seals.

Keywords: contact; nominal contact pressure; specific area of rough contact surface; tightness of cylinder-piston seals; duration of gas flow; molecular and transient gas flow modes; profilogram, stochastic field theory.

Формулювання цілі статті

Необхідно розробити методи розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень для молекулярного та перехідного режимів перетікання (плину) газу в ущільненні та провести аналіз точності створених методів, а також виконати аналіз точності розроблених інженерних методів

Результати досліджень

Розглянемо розрахункову схему торцевого ущільнення (рис. 1) з метою подальшого перетворення результатів для випадку циліндро-поршневих ущільнень.

При молекулярному режимі плину газу тиск в ущільненні (рис. 1) розподілений за законом [1]:

$$p = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{\ln\left(r_2/r_1\right)} \ln\left(r/r_1\right). \tag{1}$$

Натікання газу може бути визначене за формулою [1]:

$$Q_M = -\frac{4}{3}\frac{F^2}{P} V_g \frac{dp}{dr}, \tag{2}$$

де F – площа поперечного перерізу щілинних каналів; P – периметр поперечного перерізу щілинних каналів, що омивається середовищем; V_g – середня швидкість молекул газу:

$$V_g = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}; \tag{3}$$

R – молярна газова стала, Дж/(моль·К); T – абсолютна температура газу, К; μ – молярна маса газу, кг/моль.

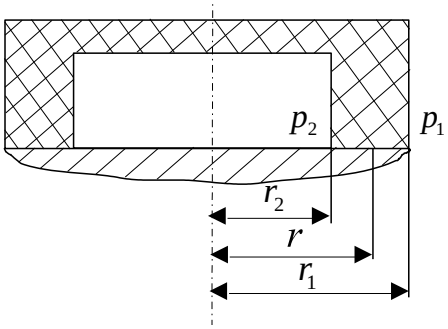


Рис. 1. Розрахункова схема торцевого ущільнення

З (1) отримуємо:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{p_2 - p_1}{r\ln\left(r_1/r_2\right)}. \tag{4}$$

Величини F та P можна розрахувати, якщо відомі питомий міжконтактний об'єм V та питома площа поверхні стику, що омивається середовищем, S_K:

$$F = 2\pi r V; \tag{5}$$

$$P = 2\pi r S_K. \tag{6}$$

Підставимо (4–6) в (2):

$$Q_M = \frac{8\pi}{3} V_g \frac{V^2}{S_K} \frac{p_2 - p_1}{\ln\left(r_1/r_2\right)}. \tag{7}$$

При $r_2 \to \infty$ формула (7) буде описувати плин газу в смузі шириною b, і тоді отримаємо випадок циліндро-поршневого ущільнення. При цьому маємо:

$$\ln\frac{r_1}{r_2} \to \frac{b}{r_2}; \quad Q_M \to \frac{8\pi r_2}{3b} V_g \frac{V^2}{S_K}\left(p_2 - p_1\right).$$

Якщо врахувати, що $2\pi r_2$ – довжина кола, що омивається газом, то величина натікань в межах одиничної довжини складає: $Q'_M = \frac{4}{3b} V_g \frac{V^2}{S_K}\left(p_2 - p_1\right)$.

Величина натікань в межах довжини поперечного профілю C, що омивається газом $Q_M = CQ'_M$.

Якщо позначити діаметр ущільнюючої поверхні d і розглядати натікання вздовж всього кола діаметром d, то, оскільки в цьому випадку $C = \pi d$, отримаємо:

$$Q_M = \frac{4\pi d}{3b} V_g \frac{V^2}{S_K}\left(p_2 - p_1\right), \tag{8}$$

де S_K – питома площа поверхні стику, що омивається середовищем, тобто відношення площі поверхні, що омивається середовищем, до номінальної площі контакту, і розраховується за формулою:

$$S_K = \frac{1}{2} erfc\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\left(1 + S\right), \tag{9}$$

де u – ефективний рівень деформації, S – питома площа шорсткої поверхні.

В результаті перетворень

$$Q_M = \frac{m_0 d}{b\left(1+S\right)} V_g \left(p_2 - p_1\right) F_M\left(u\right), \tag{10}$$

де

$$F_M\left(u\right) = \frac{4\pi}{3} \frac{\left[F_V\left(u\right)\right]^2}{F_S\left(u\right)}. \tag{11}$$

Функції $F_V\left(u\right)$, $F_S\left(u\right)$ потрібно розраховувати за формулами (12, 13):

$$F_V\left(u\right) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) + u erfc\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]; \tag{12}$$

$$F_S\left(u\right) = \frac{1}{2} erfc\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right). \tag{13}$$

Назвемо зведеним натіканням при молекулярному плині газу наступну величину:

$$\tilde{Q}_M = Q_M \frac{b\left(1+S\right)}{m_0 d V_g \left(p_2 - p_1\right)}. \tag{14}$$

Очевидно, що $\tilde{Q}_M = F_M(u)$. На підставі (10, 12, 13) за допомогою програми Strom_M [2], написаної з використанням програми Mathcad 2000 Professional, розрахований зв'язок зведеного натікання $\tilde{Q}_M$ з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 2.

Залежність, представлена на рис. 2, була апроксимована формулою:

$$\tilde{Q}_M = \begin{cases} 0,646\ln^{1,636}\left(1+\dfrac{1,918}{K^{1,807}}\right), & (K<1,5); \\ 4,794\cdot 10^{-3}\ln^{3,321}\left(1+\dfrac{93,706}{K^{2,615}}\right), & (K\geq 1,5) \end{cases} . \quad (15)$$

Формула (15) отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_SM_1, Appr_SM_2 [2], написаними з використанням Mathcad 2000 Professional. Вона якісно правильно описує поведінку зведеного натікання $\tilde{Q}_M$ при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що $\lim\limits_{\sigma_n\to 0}\tilde{Q}_M = \infty$; $\lim\limits_{\sigma_n\to\infty}\tilde{Q}_M = 0$.

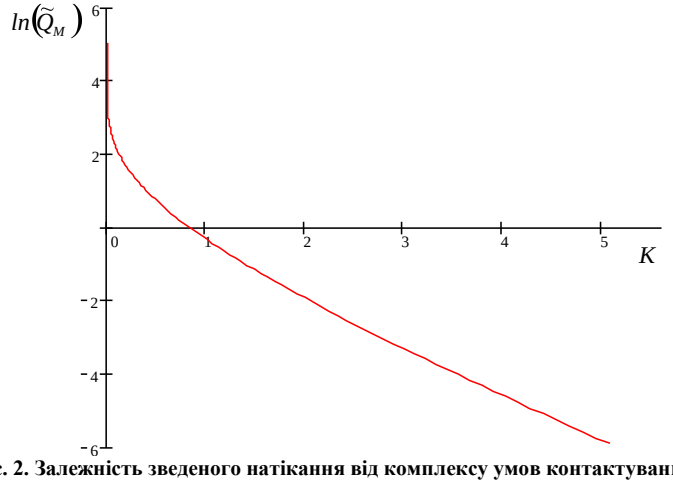
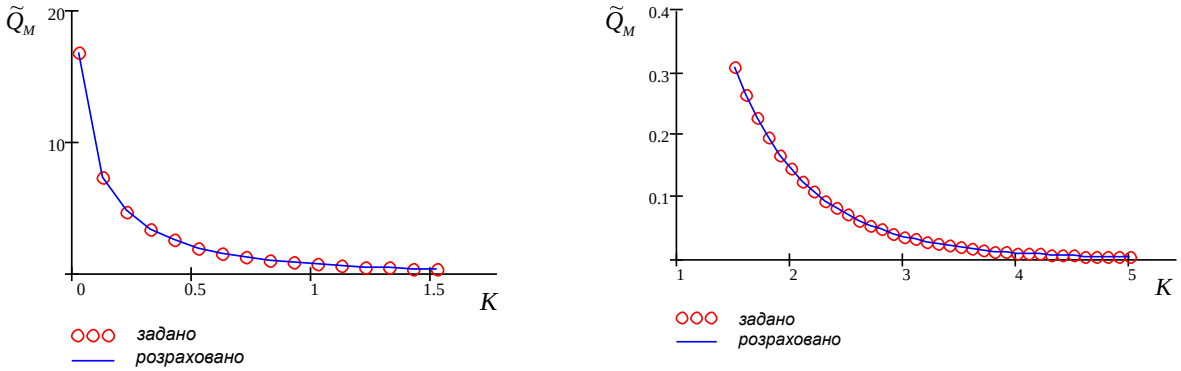


Рис. 2. Залежність зведеного натікання від комплексу умов контактування

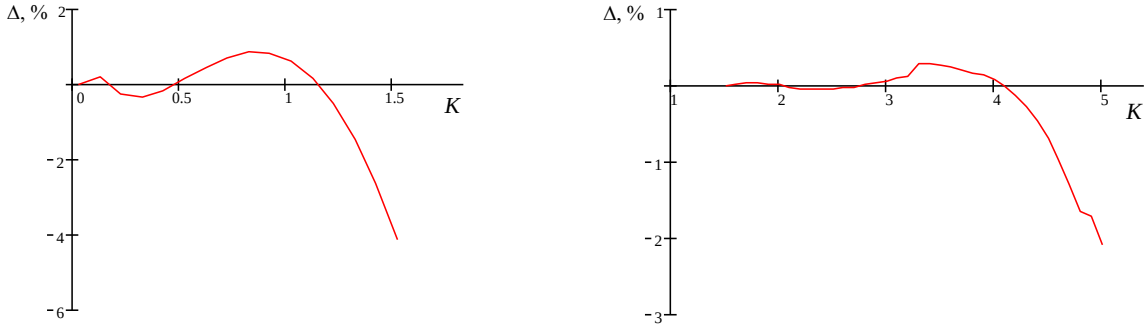
На рис. 3 співставленні задані та розраховані значення зведеного натікання $\tilde{Q}_M$. Під заданими слід розуміти значення, визначені за формулами (10, 12, 13). Під розрахованими – визначені за формулою (15).

Для того, щоб оцінити похибку, яка виникає при заміні точної формули наближеною формулою (15), на рис. 4 представлена залежність відсоткової розбіжності заданих та розрахованих значень (позначена як Δ) від комплексу умов контактування.



а) K<1,5 **б) K≥1,5**

Рис. 3. Співставлення заданих та розрахованих значень зведеного натікання



а) K<1,5 **б) K≥1,5**

Рис. 4. Оцінка похибки, яка виникає при заміні точної формули розрахунку зведеного натікання наближеною формулою

Для розрахунку натікання при молекулярному плині газу Q_M отримуємо кінцеву розрахункову формулу:

$$Q_M = \frac{m_0 d}{b(1+S)} V_g \left(p_2 - p_1\right) \tilde{Q}_M . \quad (16)$$

Натікання при перехідному режимі плину газу Q_U можна знайти на підставі значень, розрахованих для в'язкісного та молекулярного режимів. Як показано в [3], можна використати формулу:

$$Q_U = Q_B + zQ_M , \quad (17)$$

де

$$z = \frac{1+1,25 d_{екв}/\bar{\lambda}}{1+1,55 d_{екв}/\bar{\lambda}} . \quad (18)$$

Висновки

Для випадку молекулярного плину газу в циліндро-поршневому ущільненні отримана точна формула розрахунку натікань: $Q_M = \frac{4\pi d}{3b} V_g \frac{V^2}{S_K}\left(p_2 - p_1\right)$, де V_g – середня швидкість молекул газу:

$$V_g = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad ;$$

На підставі точної формули отримана розрахункова формула:

$$Q_M = \frac{m_0 d}{b(1+S)} V_g \left(p_2 - p_1\right) \tilde{Q}_M \quad ,$$

де

$$\tilde{Q}_M = \begin{cases} 0,646 \ln^{1,636}\left(1 + \frac{1,918}{K^{1,807}}\right), & \left(K < 1,5\right); \\ 4,794 \cdot 10^{-3} \ln^{3,321}\left(1 + \frac{93,706}{K^{2,615}}\right), & \left(K \geq 1,5\right) \end{cases} .$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою зведеного натікання $\tilde{Q}_M$, різняться не більше, ніж на 4%.

Натікання при молекулярному плині газу Q_M прямо пропорційне квадратові середньоарифметичного відхилення R_a точок профілю, діаметрові ущільнюючої поверхні d, середній швидкості молекул газу V_g, різниці тиску газу на вході на виході ущільнюючого елементу. Натікання Q_M обернено пропорційне ширині ущільнюючої поверхні b. Зі збільшенням питомої площі шорсткої поверхні S та комплексу умов контактування K натікання зменшується.

Натікання при перехідному режимі плину газу Q_U можна знайти на підставі значень, розрахованих для в'язкісного та молекулярного режимів: $Q_U = Q_B + zQ_M$, де $z = \frac{1+1,25 d_{екв}/\bar{\lambda}}{1+1,55 d_{екв}/\bar{\lambda}}$.

Література

1. Макушкин А.П. Исследование герметичности разъемных соединений при криогенных температурах / А.П. Макушкин, И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Трение и износ. – 1988. – № 2. – С. 197–206.

2. Тимощук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. … канд. техн. наук / О.Г. Тимощук – Хмельницький, 2003. – 386 с.

3. Макушкин А.П. Научно-технические основы создания полимерных уплотнений и узлов трения оборудования криогенных систем : дис. ... д-ра техн. наук / А.П. Макушкин – Балашиха, 1982. – 511 с.

References

1. Makushkin A.P. Issledovanie germetichnosti razemnyh soedinenij pri kriogennyh temperaturah / A.P. Makushkin, I.V. Kragelskij, N.M. Mihin // Trenie i iznos. – 1988. – № 2. – S. 197–206.

2. Tymoshchuk O.H. Rozrobka metodiv rozrakhunku ta eksperymentalnoho doslidzhennia hermetychnosti bezzmashchuvalnykh tsylindro-porshnevykh ushchilnen : dys. … kand. tekhn. nauk / O.H. Tymoshchuk – Khmelnytskyi, 2003. – 386 s.

3. Makushkin A.P. Nauchno-tehnicheskie osnovy sozdaniya polimernyh uplotnenij i uzlov treniya oborudovaniya kriogennyh sistem : dis. ... d-ra tehn. nauk / A.P. Makushkin – Balashiha, 1982. – 511 s.

Рецензія/Peer review : 15.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-24-27
УДК 677.055.621

Л.М. БЕРЕЗІН
Київський національний університет технологій та дизайну
К.В. САВЧЕНКО
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України

МОДЕЛЮВАННЯ ПОДАТЛИВОЇ ГРАНІ КЛИНУ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ЗА КРИТЕРІЯМИ ДЕФОРМАЦІЇ ТА МІЦНОСТІ

Метою даного дослідження є розробка комплексного підходу до розрахунків клинів з податливою робочою гранню різних конструкцій за критеріями міцності та податливості на основі методу скінченних елементів з використанням некомерційного програмного забезпечення Code_Aster. Було розглянуто конструкцію клину з податливою робочою гранню, яка забезпечує одночасну балкову і подвійну консольну деформації. За результатами обчислювальних експериментів були визначені розподіли еквівалентних напружень за Мізесом та деформацій по поверхні грані клину. Отримано оптимальні геометричні параметри робочої грані при врахуванні габаритних обмежень клину в замковій системі в'язального механізму, умов статичної міцності та максимального допустимого прогину. Отримані результати збільшують якість та ефективність проектування клинів з податливою робочою гранню, а саме – для майбутнього дослідження консолей трапецеїдальної форми з рівномірним прогином.

Ключові слова: податлива робоча грань, міцність, податливість, метод скінчених елементів, Code_Aster.

L.M. BEREZIN
Kyiv National University of Technologies and Design
K.V. SAVCHENKO
Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

MODELLING OF A FLEXIBLE GRINDER OF A COMPLEX SHAPE FORM ON THE CRITERIA OF DEFORMATION AND STRENGTH

The study aims to develop a complex approach to cams calculations with a flexible working facet of different designs by strength and flexibility criteria based on the finite element method using the non-commercial Code_Aster software (Analysis of Structures and Thermo mechanics of Studies and Research), as an alternative licensed software package ANSYS Structures, NASTRAN, ABAQUS etc. The cam with a flexible working facet, which provides simultaneous beam and double cantilever deformations, is considered. A flexible working facet is a statically indeterminate spatial construction with two rigid seals*. Analytical research is sophisticated in calculations and at the same time a little informative in the final result. So we used computer simulation. Two contradictory requirements were considered: the simultaneous provision of strength and required pliability at the same time. The direct task of calculating the geometric parameters of a flexible working facet was to meet the requirements of compliance, and the strength requirements were met with the required margin. A parametric model of a flexible working facet was constructed as an ordered grid of finite elements of the same size without the use of elongated and flat elements. The Salome pre-processor was used. The characteristics of the stress-strain state of the object of study were determined by varying the geometric parameters of the cams, taking into account the constraints of the cam space in the knitting system, the conditions of static strength and the maximum allowable deflection. Based on the results of the computational experiments, the distributions of equivalent stresses on Mises and deformations on the surface of the cam facet were determined. It is established that the use of a flexible working facet cam with the calculated geometric parameters provides the rigidity at the level of C = 4,51 • 104 N / m, which leads to a decrease of the vertical dynamic component load by 1.87 times compared with the cam of classical execution without elastic base. The analysis of the results confirmed the feasibility of using this complex in the problems of modelling the details of complex shapes, in particular pliable cam faces. The stress distribution along the length of the cantilever beams suggests that it is advisable to use trapezoidal cantilevers in the future to provide uniform flexural resistance, which will minimize cam sizes.*

Keywords: flexible working facet; strength; flexibility; finite element method; Code_Aster.

Вступ

Основним параметром, що визначає надійність в'язального обладнання, є число відмов стержньових елементів (в'язальних голок, селекторів, штовхачів), на яке впливає ударне навантаження при взаємодії з клинами в'язальних механізмів. Одним з найефективніших способів зниження такого навантаження є зменшення жорсткості в парі п'ятки стержньового елементу та робочої поверхні клину. Оскільки фізико-механічні характеристики матеріалів, які використовуються при виготовленні клинів, суттєво не відрізняються, необхідну жорсткість забезпечують за рахунок збільшення податливості їх робочої поверхні. Тому основним напрямком підвищення довговічності голок є удосконалення конструкцій клинів, передусім застосування клинів з податливими робочими гранями (ПРГ), бібліографія за темою якої представлена в [1]. Теоретичні положення їх проектування, а саме дослідження впливу жорсткості, наприклад, в парі голка–клин на напруження, що виникають в в'язальній голці при ударі по клину [2], проектування клинів на пружній основі за заданою рівно надійністю податливої грані за критерієм міцності [3], комплексний підхід до розрахунку геометричних параметрів податливої грані клину в залежності від характеристик її жорсткості та циклічної довговічності в детермінованій та ймовірнісній постановках [4] та інші розробки достатньо широко представлені в літературних джерелах. Оскільки переважна більшість робіт стосується різновидів конструкцій клинів з ПРГ, які утворені пазами різних форм, що розміщені вздовж робочої грані, доцільним є розгляд загального проектування клинів з податливими гранями складних конфігурацій.

Для визначення оптимальних геометричних параметрів клинів з ПРГ використовують переважно аналітичні методи, але, враховуючи розвиток сучасної комп'ютерної техніки, їм на зміну приходять чисельні

методи дослідження. Серед них найбільш ефективним вважається метод скінченних елементів. Його ідея, як відомо, полягає в апроксимації досліджуваного об'єкта моделлю, яка представляє собою сукупність елементів з скінченним числом ступенів вільності. Такі елементи взаємозв'язані між собою у вузлових точках, в яких прикладають фіктивні сили, що еквівалентні поверхневим напруженням, розподіленим по їх границям. Параметри такої ідеалізованої системи визначаються з відповідних варіаційних рішень.

Таким чином, метою даного дослідження є розробка комплексного підходу до розрахунків клинів з податливою робочою гранню різних конструкцій за критеріями міцності та податливості на основі методу скінченних елементів з використанням некомерційного програмного забезпечення Code_Aster.

Виклад основного матеріалу дослідження. В якості об'єкта досліджень було вибрано конструкцію клину складної форми [5], розрахункова схема якого показана на рис. 1. Тут h – товщина робочої грані; L, b – довжина та ширина робочої напрямної клину відповідно; H, B – довжина та ширина консольних балок клину відповідно; x – координата точки початкової взаємодії п'ятки голки з клином. Така конструкція забезпечує балкову і подвійну консольну деформації, її геометричні параметри визначали, виходячи з габаритних обмежень клину в замковій системі в'язального механізму, умов статичної міцності і максимального допустимого прогину.

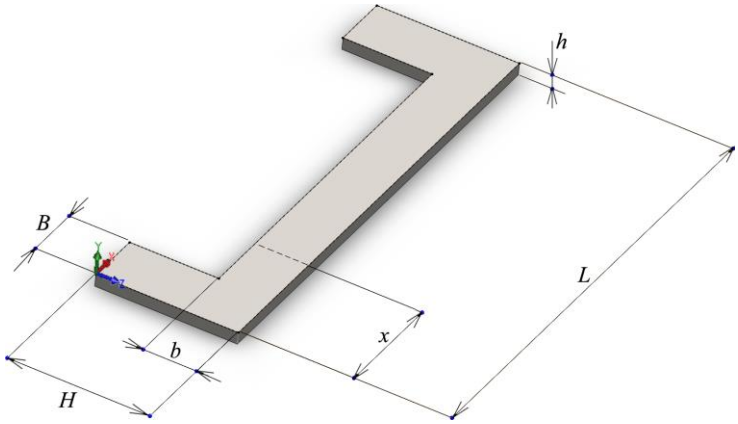


Рис. 1. Розрахункова схема податливої робочої грані клину

Для вирішення вказаної задачі можна використовувати два різних підходи: аналітичний та комп'ютерне моделювання. На етапі попереднього розрахунку рекомендується спрощений аналітичний розв'язок [6] з обчисленням розмірів податливої грані досліджуваного клину, де в якості характеристичного критерію вибирали мінімальне значення ударного навантаження в системі клин–голка–напрямна пазу циліндру при накладанні обмежень за умовою міцності та допустимої деформації згину грані клину в точці удару в вертикальному напрямку. Точність результату в силу певних припущень (наприклад, представлення деформації просторової несиметрично навантаженої незамкнутої рами сукупністю двох незалежних пружних систем) має наближений характер, тому він достатній тільки для аналізу впливу геометричних параметрів на вибраний характеристичний критерій. Аналітичний розрахунок ПРГ клину як статично невизначеної просторової конструкції з двома жорсткими закладеннями є об'ємним за обчисленнями та водночас малоінформативним за кінцевим результатом. Найбільш наочними вважаються результати, які отримані при комп'ютерному моделюванні, за допомогою якого також усувають більшість припущень, що мають місце в аналітичних методах.

При розрахунках будь-яких пружних елементів необхідно враховувати дві основні вимоги: одночасне забезпечення умови міцності та необхідної податливості. Переважно прямою задачею розрахунку геометричних параметрів ПРГ, вважають виконання вимог за податливістю, а вимога за міцністю повинна задовольнятися з необхідним запасом.

Для забезпечення процесу утворення петельних рядів однакової довжини необхідно, щоб деформація згину v робочої грані клину в точці удару в вертикальному напрямку задовольняла умові:

$$v_{max} \leq 0{,}2 \text{ мм}. \tag{1}$$

Оскільки ударне навантаження в парі голка–клин залежить від горизонтальної складової швидкості голки, що дорівнює коловій швидкості циліндру, визначення геометричних параметрів ПРГ клину виконували для значення навантаження P = 14 Н.

Для представленої моделі обмеження за міцністю записують у такій формі:

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{-1}}{n}, \tag{2}$$

де σ_{-1} – границя втоми матеріалу, n – коефіцієнт запасу міцності.

Для підшипникової сталі ШХ15, яку використовують у виробництві клинів, границя втоми становить 800 МПа [7]. Враховуючи [8] та рекомендації [9], для схеми розрахунку за границею втоми при навантаженнях з симетричним циклом вибираємо коефіцієнт запасу міцності n = 2,4. Тому в нашому дослідженні приймається, що $\sigma_{\max} \leq 333$ МПа.

Визначення границь системи стосовно клину є тривіальною задачею: незалежними параметрами, що управляються, є B, b та h, а довжина поперечної балки робочої напрямної клину L задається рівною 27

мм, довжини консольних балок приймають H= 7 мм (розміри L та H задаються з конструктивних міркувань у відповідності до обмежень в замковій системі в'язального механізму).

Як вказано вище, головна особливість методу скінченних елементів полягає в можливості моделювання як простих, так і складних тіл з різними властивостями матеріалу, граничними умовами та навантаженням, які можуть бути використані для розв'язання різного типу задач. Проте варто відмітити, що при створенні скінченно-елементної моделі врахувати всі перелічені фактори практично неможливо. Тому, залежно від мети дослідження, розглядаються в певній мірі ідеалізовані моделі з певними спрощеннями в геометрії, властивостях матеріалу, умов навантаження, а ступінь такої ідеалізації впливає на достовірність отриманих результатів та трудомісткість розрахунків.

Для визначення оптимальних геометричних параметрів ПРГ було побудовано її параметричну модель в програмному комплексі Code_Aster з використанням препроцесору Salome [10]. Конструкція ПРГ має просту геометрію, тому для побудови скінченно-елементної моделі, яка показана на рис. 2 (тут A – площини для жорсткого закріплення, P – задане навантаження), було використано об'ємний 8-вузловий скінченний елемент, який є досить простим для розрахунку та дозволяє отримати достатню точність результату при визначенні напружено-деформованого стану об'єкту дослідження. При скінченно-елементному моделюванні враховували не тільки вибір типу скінченного елементу, а й його розмір, адже точність результату може знизитись, якщо в зонах з різкою зміною напружень і деформацій розміри сусідніх елементів будуть суттєво відрізнятись. Тому для моделі ПРГ створювалась впорядкована сітка скінченних елементів одного розміру, без використання витягнутих і плоских елементів.

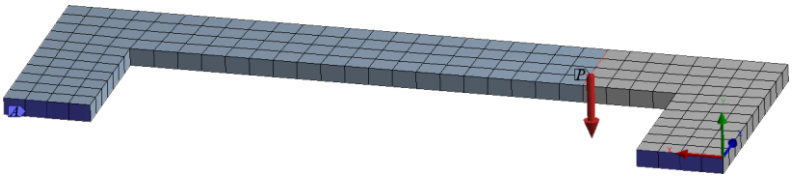


Рис. 2. Скінченно-елементна модель податливої робочої грані клину

Відомо, що ПРГ при експлуатації має консольне закріплення. Тому в якості граничних умов в скінченно-елементній моделі було задано жорстке закріплення на відповідних поверхнях консольних балок. Для моделювання взаємодії п'ятки голки з ПРГ клину задавалось навантаження P уздовж осі Oy. Його амплітуда дорівнювала P = 14 Н.

Розрахунок характеристик напружено-деформованого стану об'єкту дослідження проводився при варіюванні геометричних параметрів клину B, b та h таким чином, щоб задовольнялися умови (1) та (2).

За результатами виконаних обчислювальних експериментів були визначені розподіли еквівалентних напружень за Мізесом та деформацій в клині, приклади яких показано на рис. 3 і 4 відповідно.

Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень σ за Мізесом в клині при дії навантаження P = 14 Н

Рис. 4. Розподіл прогинів v в клині при дії навантаження P = 14 Н

З представлених даних видно, що максимальні напруження спостерігаються на правій консольній балці клину біля защемлення, при цьому максимальний прогин відбувається по грані взаємодії п'ятки голки з робочою гранню. Такий характер розподілів вказаних характеристик збігається з проведеними раніше аналітичними розрахунками [6]. Також отримано наближені до оптимальних геометричні параметри клину, які задовольняють вимоги за податливістю та міцністю, а саме b = 3 мм, h = 0,7 мм та B = 3,3 мм.

Окрім цього, встановлено, що застосування ПРГ клину з розрахованими геометричними параметрами забезпечує приведену жорсткість на рівні $C = 4{,}51 \cdot 10^4$ Н/м, що призводить до зниження вертикальної динамічної складової навантаження в 1,87 разу порівнян з клином класичного виконання без пружної основи.

Висновки

За результатами обчислювальних експериментів визначені розподіли еквівалентних напружень за Мізесом та деформацій робочої грані клину та отримано наближені до оптимальних геометричні параметри клину, виходячи з габаритних обмежень клину та вимог за податливістю і міцністю. Параметричну модель клину побудовано на основі методу скінченних елементів з використанням некомерційного програмного комплексу Code_Aster. Аналіз результатів підтвердив доцільність використання цього комплексу в задачах моделювання деталей складної форми, зокрема податливих граней клинів.

Розподіл напружень по довжині консольних балок передбачає використання трапецієвидних консолей для забезпечення рівномірного опору згину, що дозволить мінімізувати розміри клину.

Література

1. Березін Л.М. Оцінка довговічності та надійності в'язальних механізмів панчішно-шкарпеткових автоматів : монографія / Л.М. Березін. – К. : КНУТД, 2013. – 191 с.

2. Плешко С.А. Вплив жорсткості пари голка-клин на напруження, що виникають в стержні в'язальної голки при ударі об клин / С.А. Плешко, Б.Ф. Піпа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2(259). – С. 17–19.

3. Березін Л.М. Розрахунок податливої грані клину панчішних автоматів за заданою рівно надійністю за критерієм міцності / Л.М. Березін // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. –2013. – № 3. – С. 168–172.

4. Березін Л.М. Розрахунок податливої грані клину за критеріями жорсткості та довговічності / Л.М. Березін // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. –2016. – № 3 (98). – С. 68–73.

5. А. с. 490882 СССР, МКИЗ D 04 B 15/32. Клин чулочного автомата / В.П. Волощенко, Г.И. Коньков, Л.Н. Березин, П.А. Агафонов (СССР). – № 3662647/28-12 ; заявл. 11.11.83 ; опубл. 28.02.86, Бюл. № 8. – 4 с.

6. Березін Л.М. Розрахунок геометричних параметрів податливої грані клину / Л.М. Березін // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2013. – № 1 (69). – С. 11–14.

7. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник : в 2 т. / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К. : Наукова думка, 1987. – Т. 2. – 808 с.

8. Павлов В.С. Визначення коефіцієнта запасу міцності при використанні критерію найбільшого нормального напруження / В.С. Павлов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 39–43.

9. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных загрузках / В.Т. Трощенко. – К. : Наукова думка, 1978. – 176 с.

10. Aubry J.P. Beginning with Code_aster / Aubry, J.P. – Paris, 2013. – 329 p.

References

1. Berezin L.M. Otsinka dovhovichnosti ta nadiinosti viazalnykh mekhanizmiv panchishno-shkarpetkovykh avtomativ : monohrafiia / L.M. Berezin. – K. : KNUTD, 2013. – 191 s.

2. Pleshko S.A. Vplyv zhorstkosti pary holka-klyn na napruzhennia, shcho vynykaiut v sterzhni viazalnoi holky pry udari ob klyn / S.A. Pleshko, B.F. Pipa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 2(259). – S. 17–19.

3. Berezin L.M. Rozrakhunok podatlyvoi hrani klynu panchishnykh avtomativ za zadanoiu rivno nadiinistiu za kryteriiem mitsnosti / L.M. Berezin // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky. –2013. – № 3. – S. 168–172.

4. Berezin L.M. Rozrakhunok podatlyvoi hrani klynu za kryteriiamy zhorstkosti ta dovhovichnosti / L.M. Berezin // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky. –2016. – № 3 (98). – C. 68–73.

5. s. 490882 SSSR, MKYZ D 04 B 15/32. Klyn chulochnoho avtomata / V.P. Voloshchenko, H.Y. Konkov, L.N. Berezyn, P.A. Ahafonov (SSSR). – № 3662647/28-12 ; zaiavl. 11.11.83 ; opubl. 28.02.86, Biul. № 8. – 4 s.

6. Berezin L.M. Rozrakhunok heometrychnykh parametriv podatlyvoi hrani klynu / L.M. Berezin // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky. – 2013. – № 1 (69). – C. 11–14.

7. Troshenko V.T. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov : spravochnik : v 2 t. / V.T. Troshenko, L.A. Sosnovskij. – K. : Naukova dumka, 1987. – T. 2. – 808 s.

8. Pavlov V.S. Vyznachennia koefitsiienta zapasu mitsnosti pry vykorystanni kryteriiu naibilshoho normalnoho napruzhennia / V.S. Pavlov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2008. – № 3. – S. 39–43.

9. Troshenko V.T. Prochnost metallov pri peremennyh zagruzkah / V.T. Troshenko. – K. : Naukova dumka, 1978. – 176 s.

10. Aubry J.P. Beginning with Sode_aster / Aubry, J.P. – Paris, 2013. – 329 p.

Рецензія/Peer review : 15.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Місяць В.П.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-28 35
УДК 621.9.015 (019): 678.057.745.5

Л.В. ПРИСЯЖНИЙ, Є.А. УРБАНЮК
Хмельницький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МАТРИЦЬ ПРЕС-ФОРМ

В роботі представлено вивчення похибок оброблення поверхонь матриць прес-форм. До них належать похибки, викликані утворенням гребінців та похибки апроксимації поверхонь 3D-моделей. За результатами досліджень отримані рекомендації для розроблення керуючих програм для чистового фрезерування формотворних поверхонь мало- (до 100 мм) та крупногабаритних матриць прес-форм.

Ключові слова: матриці прес-форм, чистове фрезерування, висота гребінців, похибка апроксимації, програмування в CAM-пакеті.

L.V. PRYSYAZHNYI, E.A. URBANYUK
Khmelnytskyi National University

THE PERICULARITIES OF MODERN TECHNOLOGIES APPLICATION OF MATRICES MOLDS' MANUFACTURING

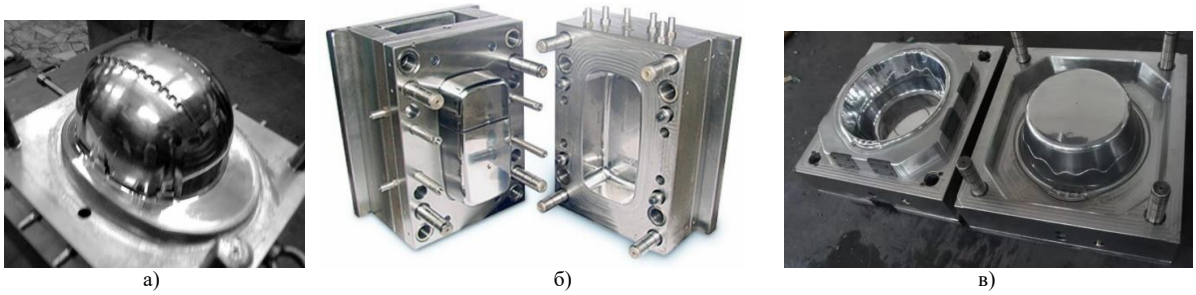
The paper presents the analysis of errors of molds' machining surfaces, including errors that are caused by the formation of combs and errors in the approximation of the surfaces of 3D matrix models. These errors should be taken into account in the process of the develop of the control programs in the CAM package for operations that are performed on CNC machines. The following tasks were set: a) to reduce of the height of the combs to the permissible value (0,01…0,02 mm) by selecting of the tool diameter, interlacing and machining strategy; b) to study the peculiarities of the forming of the approximation's error of matrices' 3D models, depending on the shape and the size of the model, and to develop recommendations for the reducing them to acceptable values. Error formation was studied using 3D models with dimensions up to L×B×H=500×500×500 mm. Dependences of the height of the combs on the milling step were obtained when machining the horizontal plane for the different diameters of a spherical mill. The influence of the inclination angle of the machined plane and the milling step for a spherical milling cutter ∅10 mm on the height of the combs was studied. Recommendations for the choice of milling strategies with constant and variable milling step have been developed. Triangulated surface models were created by the translation of the solid 3D models of typical matrix elements from the CAD program that uses Parasolid kernel into stl format. The marginal error values for the approximation of 3D models in the form of a parallelepiped, cylinder, sphere, and torus with different aspect ratios by X, Y and Z coordinates are presented in the tables. According to the results of the research, recommendations were obtained for the development of control programs for finishing milling of molding surfaces of small- (up to 100 mm) and large-sized die molds.

Keywords: mold matrix, finishing milling, the height of the combs, error of approximation, programming in the CAM program.

Вступ

Складними у виготовленні деталей машинобудівного виробництва є формотворні деталі з фасонними поверхнями, такими як матриці прес-форм для виливання під тиском виробів з термопластичних матеріалів. Такі матриці прес-форм можуть мати елементи різної форми, що виступають чи заглиблені.

Чистове оброблення формотворних поверхонь різної форми цих матриць (рис. 1), зазвичай, виконують сферичними фрезами на високошвидкісних верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Після чистового фрезерування на формотворних поверхнях часто залишаються гребінці, які попередньо знімають шліфувальною шкіркою з наступним поліруванням до шорсткості Ra0,4 мкм.



а) б) в)

Рис. 1. Матриці прес-форм з типовими формотворними елементами: а) з виступом, близьким за формою до сферичної; б) з елементами призматичної форми; в) з елементами конічної форми

Практикою встановлено, що висота гребінців на поверхнях матриці після чистового оброблення сферичними фрезами не повинна перевищувати 0,01…0,02 мм, що дасть можливість виконати наступні викінчувальні операції доведення та полірування без надмірних витрат.

Проблема утворення гребінців на оброблювальних поверхнях деталей розглядалась в роботах [1–3], де авторами отримані окремі залежності для визначення їх висоти. Крім того в довідках (Help) до відомих CAM-пакетів [4–7] вказується на необхідність задання параметрів операції фрезерування, які впливають на точність і якість оброблених просторових поверхонь. В роботах авторів [8, 9] відмічається, що більшість CAD-систем будує для CAM-пакетів триангульовані (апроксимовані плоскими трикутниками) поверхневі моделі у форматі stl-файлів. При цьому твердотільна модель трансформується в поверхневу модель з певними похибками (похибки апроксимації), які окрім утворених гребінців очевидно можуть спричинити додаткові похибки форми обробленої поверхні. Тому комплексне вивчення питання формоутворення гребінців та можливих похибок, викликаних апроксимацією поверхонь 3D-моделей при проектуванні

операцій та розробленні керуючих програм для чистового фрезерування формотворних поверхонь матриць на верстаті з ЧПК, є актуальним і є метою даної роботи. Завданнями роботи є:

а) виділення типових елементів матриць, що потребують просторового фрезерування, та аналіз утворення гребінців на їх поверхнях та розробленням рекомендацій для їх зменшення до допустимого значення (0,01…0,02 мм) шляхом вибору стратегії оброблення;

б) вивчення особливостей формування похибки апроксимації 3D-моделей залежно від форми та розмірів моделі та розроблення рекомендацій з їх зменшення до допустимих значень.

Аналіз утворення гребінців на типових формотворних елементах матриць

Більшість матриць прес-форм є деталями середніх типорозмірів, що не перевищують габаритів L×B×H=500×500×500 мм. Формотворні елементи матриць прес-форм представляють собою виступи та заглиблення різноманітної форми, які мають переважно прості типові форми: циліндра, конуса з крутими та похилими стінками, паралелепіпеда чи призми з прямими і нахиленими круто чи полого стінками або сфери. Вибрані для аналізу та моделювання оброблення типові елементи матриць представлені на рис. 2.

Найбільшу складність для оброблення представляють виступи та заглиблення з нахиленими стінками, які потребують застосування сферичних фрез. Під час моделювання оброблення матриць в CAM-пакетах можливе застосування різних стратегій оброблення, тобто оброблення з постійним чи змінним кроком фрезерування як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямках, що особливо важливо при обробленні виступів з крутими та нахиленими стінками.

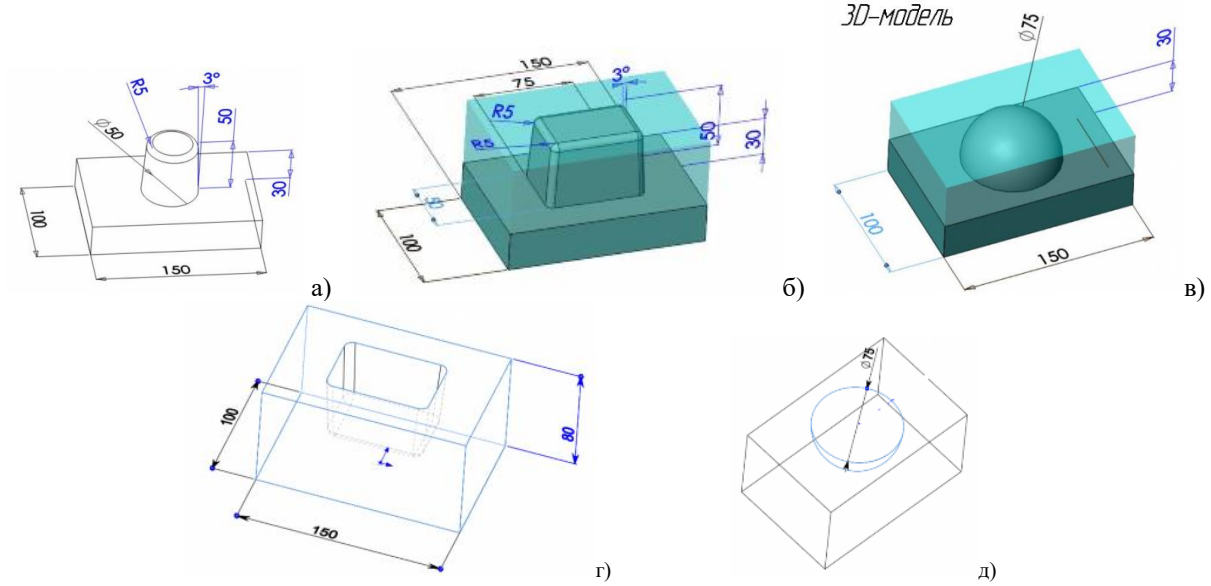


Рис. 2. Типові елементи матриць, вибрані для аналізу та моделювання оброблення: а – конічний виступ; б – призматичний виступ; в – сферичний виступ; г – призматичне заглиблення; д – сферичне заглиблення

На рис. 3 наведені схеми утворення гребінців при обробленні типових елементів з нахиленими стінками, випуклими та увігнутими криволінійними поверхнями.

Визначити висоту гребінців h з врахуванням результатів [2] можна за наступними формулами:

для схеми *а*) $$h = R - \sqrt{R^2 - \left(s/2\cos\gamma\right)^2}\ , \quad (1)$$

для схеми *б*) $$h = (R+\rho)\sqrt{1-\left(\frac{s}{2R}\right)^2} - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{(R+\rho)s}{2R}\right)^2} - R, \quad (2)$$

для схеми *в*) $$h = R - (R-\rho)\sqrt{1-\left(\frac{s}{2R}\right)^2} - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{(R-\rho)s}{2R}\right)^2} - R, \quad (3)$$

тут h – висота гребінців; R – радіус фрези; s – крок фрезерування; γ – кут нахилу стінки елемента; ρ – радіус опуклої чи увігнутої поверхні відповідно.

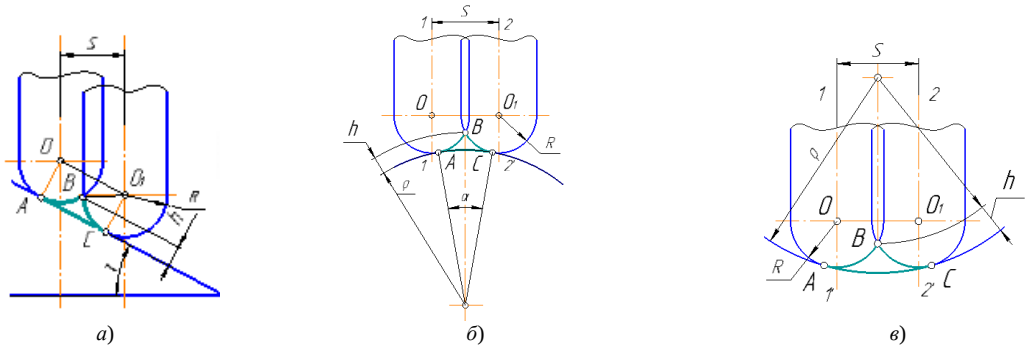


Рис. 3. Схеми утворення гребінців при обробленні: а) нахиленої стінки елемента; б) опуклої поверхні; в) увігнутої поверхні

Висоту гребінців при обробці нахилених стінок можна однозначно визначити за формулою (1). Для опуклих і увігнутих поверхонь (рис. 2, *б* і *в*) отримано формули розрахунку висоти гребінців лише для окремих випадків. Тому для загального випадку нами пропонується визначати висоту гребінців *h* на окремих ділянках криволінійних поверхонь з врахуванням кута *γ* нахилу дотичної, проведеної в точці контакту фрези з криволінійною поверхнею деталі до горизонту (див. рис. 4), про що детальніше буде розглянуто нижче.

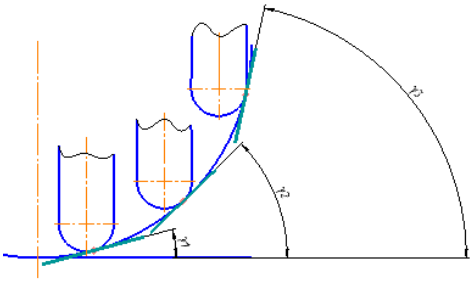
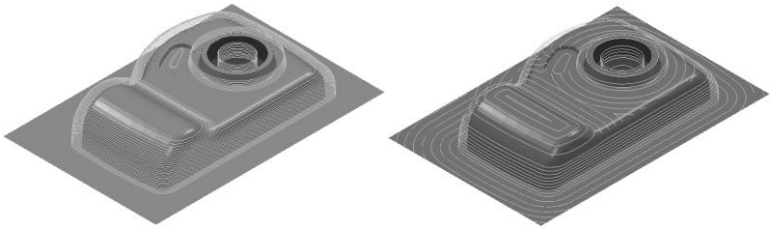


Рис. 4. Характер зміни кута *γ* при фрезеруванні увігнутих поверхонь

Вибір стратегії оброблення та діаметра інструменту для різних елементів матриць прес-форм

При підготовці керуючих програм підприємства машинобудівної галузі використовують системи автоматизованої підготовки програм середнього класу CAMWorks, FeatureCAM, SolidCam, PowerMill, Cimatron, Esprit та інші, а також так звані важкі CAD/CAM/CAE-пакети NX, CATIA та Creo. Практично всі ці пакети забезпечують вибір стратегій оброблення просторових поверхонь з *постійним* та *змінним* кроком фрезерування.

Перевагою стратегій з *постійним кроком* проходів фрезерування є простота встановлення параметрів операції, що дає програмісту можливість швидко їх налагодити та згенерувати керуючу програму. Прикладом такої стратегії оброблення може бути стратегія «Чистова з постійним Z» (рис. 5,а), що використовуються у пакеті FeatureCAM.



а) *б*)

Рис. 5. Траєкторії руху фрези при обробленні за різними стратегіями: а) за стратегією «Чистова з постійним Z»; б) за стратегією «Оптимізована Z-стратегія»

Вона створює пошарову траєкторію, що складається із сегментів з постійною координатою по осі Z. Це добре працює на поверхнях з кутом нахилу більше 75º. На поверхнях з кутом нахилу менше 15º для отримання допустимої висоти гребінців глибину різання зменшують, збільшуючи разом з тим міжрядкову подачу (крок фрезерування) ***s*** в площині XY. При виборі діаметра фрези враховуються радіуси заокруглень та заглиблень елементів матриць, що обробляються. З іншого боку, діаметр сферичної фрези впливає на висоту гребінців *h*. Для розрахунку висоти гребінців зручніше використовувати радіус фрези *R*, і, як видно із формули (1), висоту гребінців можна зменшити, збільшуючи величину ***R.*** Проте збільшення діаметра фрези може суттєво збільшити вартість різального інструменту. Зокрема, збільшення діаметра сферичної фрези фірми ATORN з ∅6 до ∅16 збільшує її вартість з 48,3€ до 215€ [10], тобто в 4,5 разу.

Таким чином, завданням програміста, який розробляє керуючу програму в CAM-пакеті, є: за попередньо вибраними значеннями діаметра фрези *D*, допустимої висоти гребінців *h* та кута нахилу стінки *γ* встановити величину міжрядкової подачі *s*. Процедуру підбору значення *s* можна провести з використанням графіків залежностей висоти гребінців від параметрів *D*, *γ* та *s* відповідно.

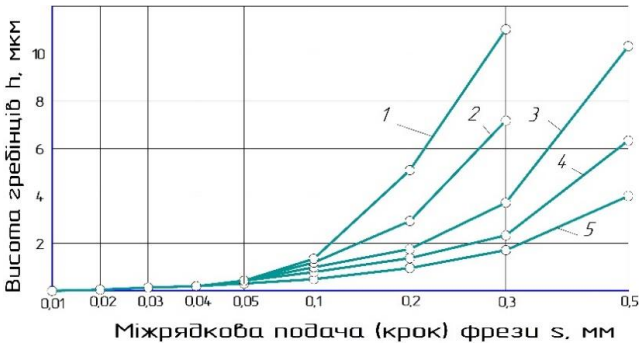


Рис. 6. Залежність висоти гребінців *h* від кроку *s* при фрезеруванні горизонтальної площини для різних діаметрів фрези: *1* – *D*=2 мм; *2* – *D*=3 мм; *3* – *D*=6 мм; *4* – *D*=10 мм; *5* – *D*=16 мм

Визначення висоти гребінців *h* проводили в програмі MS Excel, змінюючи крок фрезерування *s* в межах від 0,01 мм до 1,0 мм при діаметрах сферичних фрез *D* = 2…16 мм. Діаметри фрез для моделювання приймалися стандартними і вибиралися із каталогу фірми «ATORN» [10].

Графік залежності висоти гребінців *h* від кроку фрезерування *s* під час оброблення горизонтальної площини представлений на рис. 6.

З наведеного графіка видно, що гребінці висотою до 2 мкм отримуються при використанні фрез діаметром більше 10 мм і кроку фрезерування до 0,1 мм.

Графік залежності висоти гребінців *h* від кута нахилу оброблюваної площини *γ* та кроку фрезерування *s* для сферичної фрези Ø10 мм представлений на рис. 7.

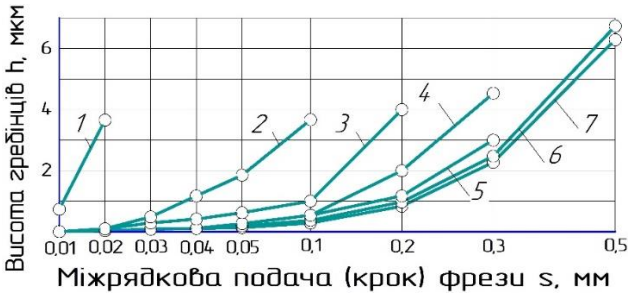


Рис. 7. Залежність висоти гребінців *h* від кроку фрезерування *s* при різних кутах нахилу стінки *γ*: *1* – 87°; *2* – 75°; *3* – 60°; *4* – 45°; *5* – 30°; *6* – 5°; *7* – 0°

З графіка (див. рис. 7) видно, що при обробленні стінок з кутом нахилу *γ*=87° отримання гребінців з висотою до 2 мкм можливе при малих кроках фрезерування у горизонтальній площині (до 0,015 мм), хоча при цьому різко зростає міжрядковий крок фрези у вертикальній площині. Очевидно, що оброблення деталі при таких малих горизонтальних міжрядкових кроках призведе до суттєвого збільшення часу оброблення.

Більш складною у налагодженні є стратегія зі *змінним кроком* фрезерування. Прикладом такої стратегії оброблення може бути «Оптимізована Z-стратегія» (рис. 5,б), що використовується у пакеті FeatureCAM. «Оптимізовану Z-стратегію» зі змінним кроком фрезерування доцільно використовувати для створення траєкторії з постійним Z-зміщенням для прямовисних ділянок моделі і траєкторії зі зміщенням в площині XY для пологих ділянок.

Вибираючи відповідну, зокрема, оптимізовану стратегію оброблення, можна керувати висотою гребінців в горизонтальному і вертикальному напрямках. Це дозволяє забезпечити допустиму висоту гребінців при фрезеруванні як похилих, так і крутих стінок, а також криволінійних поверхонь складної форми.

Врахування похибок апроксимації поверхонь матриць при програмуванні їх оброблення

В CAM-модулі для побудови траєкторії руху інструменту потрібна триангульована поверхнева модель (формат файлів stl). Однак значна кількість CAD-пакетів працює на твердотільному ядрі Parasolid, яке може створювати поверхневі моделі з похибкою [8, 9]. Завданням даного дослідження було встановити, як впливають геометрична форма 3D-моделі, її розміри та їх співвідношення на величину цієї похибки та розроблення рекомендацій із її зменшення до допустимих значень. З цією метою нами досліджувалась точність побудови триангульованих поверхневих 3D-моделей у форматі stl у системі SolidWorks.

Огранені поверхневі моделі створювались шляхом транслювання підготовленої 3D-моделі у файл stl-формату. Вікно для налагоджування запису файлу представлено на рис. 8. Граничні значення точності огранювання 3D-моделі задавали, переміщуючи повзунок «Отклонение» відповідно в ліве та праве крайнє положення, знімаючи при цьому покази (похибку апроксимації) у віконці «Допуск» (рис. 8).

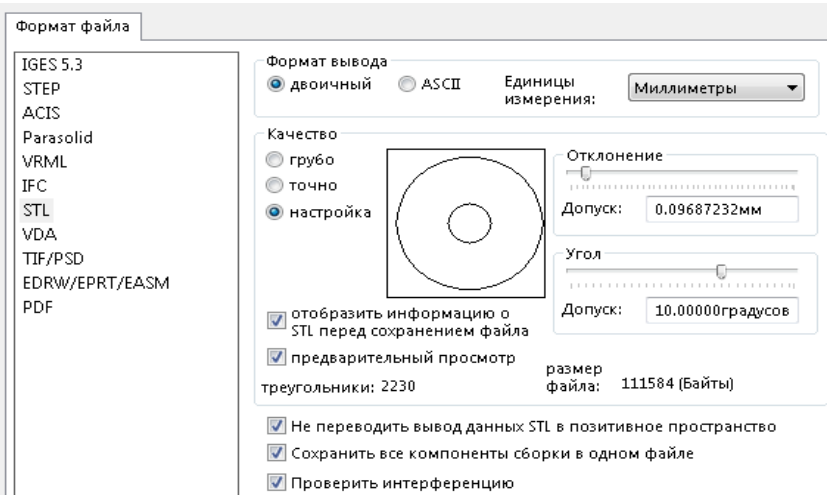


Рис. 8. Вікно налагоджування точності огранювання 3D-моделі у форматі stl

Вплив геометричної форми і розмірів твердотільної 3D-моделі на параметри ограненої поверхневої моделі

В процесі дослідження вивчався вплив форми та розмірів однакових за габаритами (за координатами X, Y та Z) 3D-моделей у вигляді куба, циліндра та сфери на можливі граничні значення похибок апроксимації при їх трансляції в поверхневу триангульовану модель формату stl.

Таблиця 1

Вплив форми та розмірів вихідної однакової за габаритами (координати X, Y, Z) 3D-моделі на точність її апроксимації та розміри stl-файла

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення граней, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
Куб	10×10×10	0.001	0.021	12/12	3/3
	100×100×100	0.009	0.206	12/12	3/3
	500×500×500	0.043	1.032	12/12	3/3
Циліндр	Ø10×10	0.001	0.021	680/144	192/41
	Ø100×100	0.009	0.206	680/144	192/41
	Ø500×500	0.043	1.032	680/144	192/41
Сфера	Ø10	0.001	0.021	$57{,}1\times10^3$/2352	$16{,}2\times10^3$/666
	Ø100	0.009	0.206	$57{,}1\times10^3$/2352	$16{,}2\times10^3$/666
	Ø500	0.043	1.032	$57{,}1\times10^3$/2352	$16{,}2\times10^3$/666

В таблиці 1 наведені граничні відхилення граней ограненої поверхневої моделі від твердотільної 3D-моделі, відповідне число граней (трикутників) та розміри файла формату stl для них. Відхилення граней вказує на відстань від апроксимованої грані ограненої поверхневої моделі до поверхні твердотільної 3D-моделі і є похибкою апроксимації. При програмуванні оброблення в CAM-пакеті потрібно враховувати мінімальне значення відхилення граней. З отриманих результатів видно, що похибка апроксимації однакових за габаритами (за координатами X, Y та Z) 3D-моделей не залежить від їх форми (для куба, циліндра та сфери отримані однакові значення), а залежить лише від їх розмірів. Графік залежності похибок апроксимації огранених поверхневих моделей від їх розмірів наведений на рис. 9.

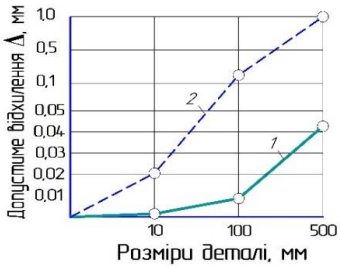


Рис. 9. Відхилення граней поверхневої та однакової за габаритами (за координатами X, Y та Z) моделі, підготовленої для програмування в CAM-модулі, при різних габаритних розмірах деталі: 1 – мінімальні; 2 – максимальні

Очевидно, що апроксимацію моделі деталі можна проводити лише в діапазоні, обмеженому лініями графіка 1 і 2. Для підвищення точності stl-файла рекомендується використовувати нижню межу 1.

Вплив співвідношення розмірів призматичної та циліндричної 3D-моделей на параметри ограненої поверхневої моделі

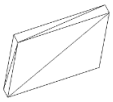
Наступним кроком було вивчення впливу співвідношення сторін 3D-моделі на похибку апроксимації. У вихідних моделях у вигляді куба з розмірами сторін 10 мм та 500 мм послідовно змінювали розміри окремих сторін, задаючи їм значення 10, 100 та 500 мм. Моделі при цьому приймали форми куба, пластини та стержня. Параметри апроксимованої моделі (табл. 2) знаходили аналогічно.

З отриманих результатів видно, що найбільші значення похибки апроксимації (0,043 мм та 0,035 мм) мають моделі з трьома (500×500×500 мм) та двома (10×500×500 мм) найбільшими габаритними розмірами. У моделей, що мають видовжену форму (наприклад, стрижень 10×10×500 мм та видовжена пластина 10×100×500 мм), похибки апроксимації майже однакові (0,0249 мм і 0,0253 мм відповідно).

У вихідних моделях у вигляді циліндра з розмірами Ø10×10 мм та Ø500×500 мм послідовно змінювали висоту, задаючи її значення 10, 100 та 500 мм. Моделі при цьому приймали форму циліндра, циліндричного стрижня та круглої пластини. Параметри апроксимованих циліндричних моделей наведені в табл. 3. З отриманих результатів видно, що найбільші похибки апроксимації (0,043 мм та 0,035 мм) мають моделі з найбільшим діаметральними розмірами (Ø500×500 мм та Ø500×10 мм). Крім цього модель з найбільшим діаметральним розміром та найменшою довжиною (Ø500×10) має більшу похибку апроксимації (0,035 мм), ніж модель з найменшим діаметральним розміром та найбільшою довжиною (Ø10×500 – 0,025 мм).

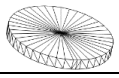
Таблиця 2

Вплив форми та розмірів вихідної призматичної 3D-моделі з різним співвідношенням розмірів граней на точність її апроксимації та розміри stl-файла

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
Куб	10×10×10	0,001	0,021	12/12	3/3
Стрижень	10×10×100	0,005	0,120	12/12	3/3
	10×10×500	0,0249	0,595	12/12	3/3
Пластина 	10×100×100	0,007	0,169	12/12	3/3
	10×100×500	0,0253	0,607	12/12	3/3
	10×500×500	0,035	0,842	12/12	3/3
Куб	500×500×500	0,043	1,032	12/12	3/3

Таблиця 3

Вплив форми та розмірів вихідної циліндричної 3D-моделі на параметри ограненої моделі та розміри stl-файлу

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
Циліндр	Ø10×10	0,001	0,021	680/144	192/41
Циліндричний стрижень	Ø10×100	0,005	0,120	288/144	82/41
	Ø10×500	0,025	0,595	144/144	41/41
Кругла пластина 	Ø100×10	0,007	0,169	752/160	213/45
	Ø500×10	0,035	0,842	752/160	213/45
Циліндр	Ø500×500	0,043	1,032	680/144	192/41

Вплив форми та розмірів 3D-моделі у вигляді тора на параметри ограненої поверхневої моделі

На формотворних поверхнях прес-форм часто зустрічаються заокруглення та галтелі у вигляді торових поверхонь. Тому наступним кроком було вивчення форми та розмірів 3D-моделі у вигляді тора на похибку апроксимації. Апроксимували торові 3D-моделі із зовнішнім діаметром 10, 50, 100 та 500 мм та радіусом бокової поверхні в 2, 10 та 25 мм. З отриманих результатів (табл. 4) видно, що найбільшу похибку апроксимації (0,035 мм) мають моделі з найбільшим зовнішнім діаметром тора (Ø500). Зміна радіуса бокової поверхні тора з 2 мм до 25 мм та форма поверхні у вигляді тора на похибку апроксимації моделі не впливає.

Отримані результати показують, що похибка апроксимації поверхневих моделей в CAD-пакетах, які використовують геометричне ядро Parasolid, не залежить від форми створюваних моделей, але залежить від розмірів моделі та їх співвідношення і може досягати значень для матриць з розмірами L×B×H=100×100×100 мм до 0,009 мм, а для матриць з розмірами L×B×H=500×500×500 мм до 0,043 мм, що для більшості завдань оброблення є може бути допустимим. Дана похибка не є критичною для виконавчих поверхонь матриць, до яких не пред'являються підвищені вимоги до точності форми.

Варто відмітити, що похибка апроксимації поверхневої моделі при її використанні в CAM-пакеті, спричинює вплив на побудову траєкторії руху фрези, що може призвести до додаткового збільшення висоти

гребінців. При розробленні керуючої програми в САМ-пакеті є можливість обмежувати величину похибки апроксимації в налагоджуваннях до імітації операції чистового оброблення поверхні до 0,01 мм, а після виконання імітації операції виконати відповідну перевірку. Для цього 3D-модель записують до та після імітації оброблення в stl-форматі та знаходять похибки апроксимації та похибки оброблення поверхні з врахуванням утворених гребінців.

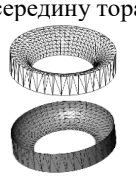
Особливості розроблення керуючої програми в САМ-пакеті при комплексному врахуванні висоти гребінців та похибки апроксимації

Як видно вище проведеного аналізу, встановлення параметрів операції чистового фрезерування виконавчих поверхонь матриць під час розроблення керуючих програм в САМ-пакеті є *багатоваріантною* задачею щодо обмеження висоти гребінців до 0,01…0,02 мм, що дасть можливість виконати наступні операції без надмірних витрат. Для крупногабаритних моделей (з розміром найбільшої сторони понад 100 мм) домінуючою похибкою може бути похибка апроксимації, яку визначають, користуючись табл. 1–4, та задають в САМ-пакеті, користуючись якомога точнішими налаштуваннями. Після чого, задавшись висотою гребінців до 0,01 мм, з допомогою графіків (рис. 6 та рис. 7) підбирають діаметр сферичної фрези *D* та величину міжрядкової подачі *s*. Далі виконують імітацію оброблення 3D-моделі в САМ-пакеті, проводять візуальну перевірку отриманих результатів (відхилень обробленої поверхні від заданої (включаючи величину зарізів та недорізів), а також висоту гребінців) та при необхідності, коригують параметри операції.

Для малогабаритних моделей (з найбільшою стороною менше 100 мм) похибка апроксимації є незначною (за даними табл. 1 менше 0,009 мм). У цьому випадку стає можливим встановити допустиму висоту гребінців в межах 0,01…0,02 мм та вибрати за графіками на рис. 6 і 7 кращі параметри операції (дешевшу фрезу меншого діаметра та більше значення міжрядкової подачі).

Таблиця 4

Вплив форми та розмірів вихідної 3D-моделі у вигляді тора на параметри ограненої моделі та розміри stl-файлу

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, Кб
		Мінімальне	Максимальне		
1/4 опуклого чи увігнутого зовні тора	Ø10×R2	0.001	0.017	23284/1188	6.6×10^3/336
	Ø50×R2	0.004	0.084	11356/1252	3.2×10^3/354
	Ø100×R2	0.007	0.168	8712/1252	2.5×10^3/354
	Ø500×R2	0.035	0.842	6600/1370	1.9×10^3/388
	Ø50×R10	0.004	0.085	23284/1188	6.6×10^3/336
	Ø100×R10	0.007	0.169	17102/1244	4.8×10^3/352
	Ø500×R10	0.035	0.842	8712/1252	2.5×10^3/354
	Ø100×R25	0.007	0.171	25608/1354	7.2×10^3/383
	Ø500×R25	0.035	0.842	12412/1252	3.5×10^3/354
1/4 опуклого чи увігнутого всередину тора 	Ø10×R2	0.001	0.017	23432/1232	6.6×10^3/336
	Ø50×R2	0.004	0.084	11338/1260	3.2×10^3/357
	Ø100×R2	0.007	0.168	8728/1260	2.5×10^3/357
	Ø500×R2	0.035	0.842	6600/1370	1.9×10^3/388
	Ø50×R10	0.004	0.085	23432/1232	6.6×10^3/349
	Ø100×R10	0.007	0.169	17182/1260	4.9×10^3/357
	Ø500×R10	0.035	0.842	8728/1260	2.5×10^3/357
	Ø100×R25	0.007	0.171	26072/1336	7.4×10^3/388
	Ø500×R25	0.035	0.842	12452/1260	3.5×10^3/357

Висновки

Розроблені рекомендації щодо програмування оброблення мало- (до 100 мм) та крупногабаритних матриць прес-форм в САМ-пакеті дозволяють програмісту скоротити час на вибір прийнятного варіанту виконання операції на верстаті з ЧПК та уникнути додаткових витрат на наступних операціях їх оброблення.

Література

1. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Математическое описание и технологическое обеспечение / Дружинский И.А. – Л. : Машиностроение, 1985.– 263 с.

2. Rong-Shine Lin. Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces [Побудова ефективних траєкторій руху інструменту для оброблення просторових поверхонь]. Journal of Engineering for Industry. Vol. 118, 1996. P. 21–28.

3. Родин П.Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением / Родин П. Р., Линкин Г. А., Татаренко В. Н. – К. : Техніка, 1976. – 200 с.

4. 3-осьове фрезерування в CAMWorks [Електронний ресурс] // HCL Tehnologies Limited, 2019. – Режим доступу : https://camworks.com/modules/3-axis-milling (дата звернення 3.12.2019).

5. Справка по FeatureCAM/О настройке обработки/Атрибуты по умолчанию для фрезерования [Електронний ресурс] // AutoDesk Knowledge Network, 2019. – Режим доступу : www.help.autodesk.com/view/FCAM/2020/RUS (дата звернення 3.12.2019).

6. Справочное руководство по PowerMill 2018 [Електронний ресурс] // Autodesk, Inc., 2020. – Режим доступу: https://knowledge.autodesk.com/ru/support/powermill/learn-explore/caas/downloads/downloads/RUS/content/powermill-2018-reference-help.html?v=2018 (дата звернення 3.12.2019).

7. HSR/HSM – Фрезерная скоростная 3D обработка/Чистовая обработка HSM в SolidCAM [Електронний ресурс] // SolidCAM, 2019. – Режим доступу : https://www.solidcam.com/ru/cam-reshenija/moduli-cam/hsm-frezernaja-skorostnaja-3d-obrabotka/ (дата звернення 3.12.2019).

8. Доброскок В. Л. Возможности современных CAD систем при переходе к триангулированным моделям / В. Л. Доброскок // Високі технології в машинобудуванні [High technologies of machine-building] : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 1 (20). – С. 79–86.

9. Щеляев А.И. Format Works – обмен данными между CATIA и SolidWorks [Електронний ресурс] / А.И. Щеляев // Сайт кампании ТЕСИС. – Режим доступу : https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/3dtransvidia/FormatWorks_2010.pdf

10. Каталог фрезерного инструмента фирмы “ATORN”. – 2017. – 350 с.

References

1. Druzhinskij I.A. Slozhnye poverhnosti. Matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obespechenie / Druzhinskij I.A. – L. : Mashinostroenie, 1985.– 263 s.

2. Rong-Shine Lin. Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces [Pobudova efektyvnykh traiektorii rukhu instrumentu dlia obroblennia prostorovykh poverkhon]. Journal of Engineering for Industry. Vol. 118, 1996. P. 21–28.

3. Rodin P.R. Obrabotka fasonnyh poverhnostej na stankah s chislovym programmnym upravleniem / Rodin P. R., Linkin G. A., Tatarenko V. N. – K. : Tehnika, 1976. – 200 s.

4. 3-osove frezeruvannia v CAMWorks [Elektronnyi resurs] // HCL Tehnologies Limited, 2019. – Rezhym dostupu : https://camworks.com/modules/3-axis-milling (data zvernennia 3.12.2019).

5. Spravka po FeatureCAM/O nastrojke obrabotki/Atributy po umolchaniyu dlya frezerovaniya [Elektronnij resurs] // AutoDesk Knowledge Network, 2019. – Rezhim dostupu : www.help.autodesk.com/view/FCAM/2020/RUS (data zvernennya 3.12.2019).

6. Spravochnoe rukovodstvo po PowerMill 2018 [Elektronnij resurs] // Autodesk, Inc., 2020. – Rezhim dostupu : https://knowledge.autodesk.com/ru/support/powermill/learn-explore/caas/downloads/downloads/RUS/content/powermill-2018-reference-help.html?v=2018 (data zvernennya 3.12.2019).

7. HSR/HSM – Frezernaya skorostnaya 3D obrabotka/Chistovaya obrabotka HSM v SolidCAM [Elektronnij resurs] // SolidCAM, 2019. – Rezhim dostupu : https://www.solidcam.com/ru/cam-reshenija/moduli-cam/hsm-frezernaja-skorostnaja-3d-obrabotka/ (data zvernennya 3.12.2019).

8. Dobroskok V. L. Vozmozhnosti sovremennyh CAD sistem pri perehode k triangulirovannym modelyam / V. L. Dobroskok // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni [High technologies of machine-building] : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2010. – Vyp. 1 (20). – S. 79–86.

9. Shelyaev A.I. Format Works – obmen dannymi mezhdu CATIA i SolidWorks [Elektronnij resurs] / A.I. Shelyaev // Sajt kampanii TESIS. – Rezhim dostupu : https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/3dtransvidia/FormatWorks_2010.pdf

10. Katalog frezernogo instrumenta firmy “ATORN”. – 2017. – 350 s.

Рецензія/Peer review: 11.12.2019 Надрукована/Printed: 12.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Харжевський В.О.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-36-35
УДК 621.01:620.193.16

Н.О. КОСТЮК, А.І. ГОРДЄЄВ, О.А. ГОРДЄЄВ
Хмельницький національний університет

ОБҐРУНТУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

Створено обладнання, яке застосовує низькочастотні вібрації для формування кавітаційних полів у рідинних субстанціях, що обробляються з метою зміни їх властивостей та знезаражування. Для дослідження динаміки роботи вібраційної машини і аналізу впливу режимів роботи приводу та конструктивних параметрів на ефективність процесу знезаражування і зміну властивостей води побудовано динамічну модель та систему диференційних рівнянь, які описують процеси, що проходять у робочому органі вібраційної машини. З аналізу аналітичної моделі отримано графічні залежності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи приводу на зміну максимального тиску у робочому органі вібраційної машини. За допомогою відеозйомки проведено візуалізацію процесів, що проходять у робочому органі вібраційної машини та встановлено виникнення кавітаційних процесів у робочому органі вібраційної машини. У результаті проведених досліджень встановлено виникнення кавітаційних процесів, які можуть впливати на реальний максимальний тиск у робочому органі вібраційної машини, тому є необхідність провести експериментальні дослідження з вимірювання дійсного максимального тиску в запропонованому обладнанні для встановлення оптимальних параметрів приводу: частоти та амплітуди коливань, розмірів поршня та насадка їх співвідношення.

Ключові слова: властивості води, знезаражування, вібраційні машини, кавітація.

N.O. KOSTIUK, A.I. HORDEEV, O.A. HORDEEV
Khmelnytsky National University

JUSTIFICATION OF DYNAMIC AND CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF A VIBRATION MACHINE FOR DISINFECTION AND CHANGE OF WATER PROPERTIES

Equipment that uses low-frequency vibrations for the formation of cavitation fields in liquid substances, which are processed with the purpose of changing their properties and decontamination, was created. To study the dynamics of the vibration machine and to analyze the effect of the drive modes and design parameters on the efficiency of the process of disinfection and change of water properties, a dynamic model and a system of differential equations describing the processes taking place in the working body of the vibrating machine are constructed. In the analysis of the dynamic model, the following assumptions are used: when the fluid oscillations, the law of liquid indissolubility (there is no gap – cavitation), the effect of temperature on the liquid is not taken into account, the amount of dissolved air content is taken into account. From the analysis of the analytical model graphical dependences of the influence of the design parameters and modes of operation of the actuator on the change of the maximum pressure in the working body of the vibrating machine were obtained. As a result of the conducted researches it is established that with increasing frequency of oscillations, piston diameter and amplitude of oscillations maximum pressure in the pulsation chamber increases. It was also found that with increasing oscillation frequencies and decreasing nozzle diameter, the maximum pressure in the pulsation chamber increases. Through video recording, the processes occurring in the working body of the vibrating machine were visualized and the occurrence of cavitation processes in the working body of the vibrating machine was determined. As a result of the conducted researches the occurrence of cavitation processes that can influence the real maximum pressure in the working body of the vibrating machine is established, therefore it is necessary to carry out experimental researches on measuring the real maximum pressure in the proposed equipment to establish the optimal drive parameters: frequency and amplitude of oscillations, piston sizes and sizes. nozzle of their ratio.

Keywords: water properties, decontamination, vibrating machines, cavitation.

Вступ

Унікальні властивості вібраційного поля дозволяють успішно здійснювати не лише оздоблювально-зачисні операції та зміцнювальні технології, сепарацію, перемішування, вібраційне транспортування у важких експлуатаційних умовах, гомогенізацію, фільтрування, сушіння, насичення середовища певними речовинами, руйнування поверхонь, але і такі операції, як знезаражування водних потоків та зміну їх властивостей. Усе це обумовлює широке і ефективне застосування вібраційних технологічних машин в багатьох галузях промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показали дослідження [1, 2] динамічних явищ у багатофазових рідинних середовищах, підданих керованим вібраційним впливам, багато з них можуть бути успішно використані як для інтенсифікації зазначених процесів, так і при розробленні та реалізації принципово нових технологічних прийомів та вібраційних машин, а саме зміни властивостей та знезаражування водних потоків.

Одним із явищ, що впливає на дисперсність та хімічний склад рідини, є кавітація. Кавітація – явище розриву рідини під дією напружень, які виникають в ході появи розрідження в краплині рідини. При розриві краплини рідини утворюються порожнини – кавітаційні пухирці, заповнені газом чи парою. Отже, розрив рідини обумовлений зміною характеристик швидкостей і тисків. Кавітаційні пухирці утворюються в тих місцях, де тиск у рідині стає нижчим деякої критичної величини. Якщо тиск знижується внаслідок зростання локальних швидкостей потоку краплинної рідини, то кавітацію називають гідродинамічною, якщо ж зниження тиску викликане проходженням акустичних хвиль, то кавітацію називають акустичною.

Критичне значення тиску, за якого відбувається розрив рідини, залежить від багатьох чинників: від чистоти рідини, вмісту у ній повітря, стану поверхні, на якій виникає кавітація. Кавітація може виникати в потоці рідини, що має змінний тиск, а також поблизу і на поверхні тіл різної форми у місцях найбільшого розрідження. Змінне поле тиску створюється різними чинниками: у результаті зміни швидкості потоку (руху тіла), впливу форми тіла, в наслідок коливального впливу на рідину (ультразвук або вібрації).

За останній період з'явився новий напрямок створення вібраційного обладнання для оброблення води кавітаційним процесом, який забезпечує надання воді нових властивостей та її знезараження [4–6]. Однак їм притаманні деякі недоліки – незначний час одноразового перебування рідини у стані виникнення кавітаційної зони. У Хмельницькому національному університеті створено ряд вібраційних машин для кавітаційного оброблення води з метою знезаражування та зміни її властивостей [7–10], які побудовані на основі багаторазового впливу на рідину у кавітаційній зоні.

Актуальність дослідження

Дослідження, що спрямовані на пошуки новітніх конструктивних рішень машин для зміни властивостей та знезаражування водних потоків із досконалою динамікою роботи, спрямованих на мінімізацію енерговитрат за умови їх придатності для промислового застосування, залишається вагомим науково-технічним завданням, так і суспільною проблемою. Тому дослідження процесу виникнення кавітації під час коливання рідини, проектування та розроблення на основі цього нових конструкцій технологічного вібраційного обладнання, у якому рідина виступає як об'єкт, що піддається керованим вібраційним впливам для зміни його властивостей та знезараження і зумовлюють актуальність порушеного завдання.

Виклад основного матеріалу

Запропоновано спосіб та конструкції обладнання для утворення пульсуючих струменів рідини [10], в якому використовується зворотно-поступальний рух рідини через насадок із гострими крайками на вході. При цьому на виході з насадка гідропульсатора отримується пульсуючий струмінь рідини, а при певних режимах його роботи утворюється струмінь із включеннями газових пухирців, що виділяються з рідини внаслідок кавітаційних явищ. На стадії прямої дії акустичних коливань на хід процесу можуть впливати тільки хімічно активні гази, тобто, O_2 і H_2. У кінцевому результаті вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщеплення молекул води в кавітаційних пухирцях. Незалежно від природи розчинених у воді речовин акустичні коливання впливають лише на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей – збільшення pH, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, а також структуризації та активації молекул. Окрім того різко збільшується швидкість реакції збуджених коливаннями молекул води з радикалами водню із виділенням складових OH та H_2. Ці процеси насичують рідину радикалами OH^-, O^-, O^+ та активними газами O_2, H_2. З іншого боку, зростають електричні нестаціонарні сили взаємодії між сусідніми диполями, які посилюють їх коливання як цілісного об'єкту і збільшують вірогідність руйнування рідкокристалічної структури рідини. Для підвищення ефективності процесу необхідно збільшити однократність вказаних впливів, що обумовлює високий ступінь зворотності реструктуризації та призводить до часткового повернення води до стану попередньої структури та, як наслідок, до низького ступеня її кінцевої реструктуризації.

Знезаражуюча дія кавітації заснована на ефектах, які виникають у турбулентних потоках рідини. Так при гідродинамічних коливаннях рідини виникають і зникають кавітаційні пухирці. При цьому стимулюються фазові переходи, підвищуються локальні температура і тиск. Окрім того, у моменти утворення і зникнення кавітаційних пухирців у газонаповненій порожнині створюються умови для появи електричних зарядів, електричних і магнітних полів. У такий спосіб рідина, яка оброблюється кавітацією, піддається термобаричній і електромагнітній дії. Особливістю кавітаційного методу оброблення води полягає в тому, що високий ступінь знезаражування води від яєць і личинок паразитів досягається за рахунок їх механічного руйнування ударними хвилями. Для руйнування бактерій і вірусів термобаричний вплив підсилюється локальною електромагнітною дією, коли наведені електричні потенціали пробивають їх мембрани і оболонки.

Механічні та фізичні способи очищення води є перспективними. На даний час розроблено ряд нових вібраційних машин та обладнання, у яких вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічній гідрокавітації) через кавітаційний пристрій. Типовим представником цієї гами є конструкція вібраційного обладнання поршневого типу з ексцентриковим приводом. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних пухирців шляхом підбору конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи [10].

Вібраційна машина для зміни властивостей та знезаражування водних середовищ (рис. 1, рис. 2) складається із корпуса 1, на якому на стійках 2 встановлено плиту 3. На фланці 4 встановлено електродвигун 5, а також підшипникову опору 6, в якій знаходиться вал 7, з'єднаний з електродвигуном 5 муфтою 8. На валу 7 встановлено ексцентрик 9 у підшипниковому корпусі шатуна 10, який з'єднаний зі штоком 11 пальцем 12. На штокові 11 встановлено поршень 13 з отворами 14, які мають гострі крайки. З'єднання шток-втулка, яка знаходиться в корпусі 15, що закріплений на кришці 16, забезпечує можливість зворотно-поступального руху штока. На штокові 11 також встановлено гумовий відбійник 17. Поршень 13 входить у циліндр 18, який знизу закритий кришкою 19, що має отвір 20 під кран для заливання водного середовища

21. Циліндр 18 кріпиться стійками 22 до корпуса 1. До підшипникової опори 6 болтами приєднана планку 23, до якої і водночас до плити 3 з допомогою болтів прикріплені два упори 24. Між упорами 24 та підшипниковим корпусом шатуна 10 на пальцях 25 встановлені дві пружини 26. Просторова 3D-модель вібраційної машини для знезаражування водних середовищ з ексцентриковим приводом представлена на рис. 2.

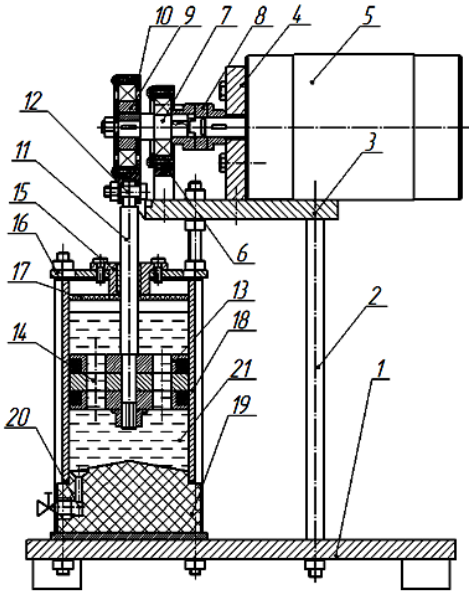


Рис. 1. Перетин А-А (до рис. 1)

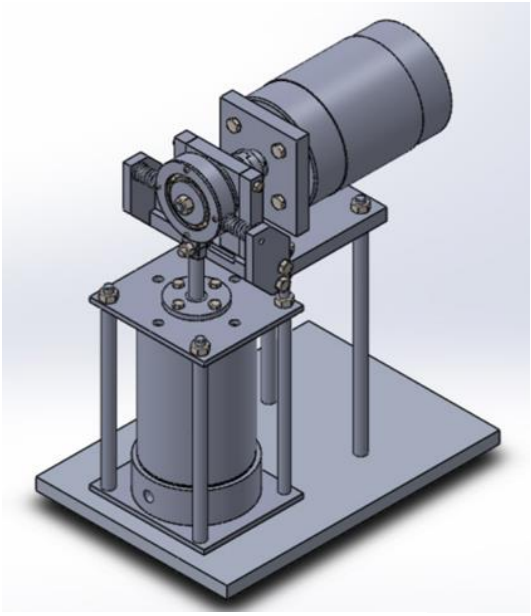


Рис. 2. Просторова 3D-модель вібраційної машини

Для побудови аналітичної моделі робочого органу, запропонованої конструкції вібраційної машини, розроблена його принципова схема, яка представлена на рис. 3.

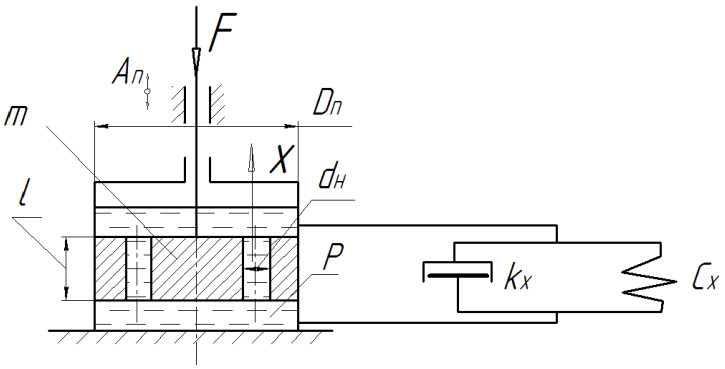


Рис. 3. Принципова схема робочого органу вібраційної машини

Для дослідження динаміки роботи вібраційної машини і аналізу впливу режимів роботи приводу та конструктивних параметрів на ефективність процесу знезаражування і зміні властивостей води запропоновано наступну систему диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} A_n dS_1 = A_н dS_2; \\ m\ddot{x} + k_x\dot{x} + c_x x = F\sin\omega t, \end{cases} \quad (1)$$

де $F = \dfrac{\pi D_n^2 \cdot P_{\max}}{4}$ – сила, що діє на шток робочого органу;

m – маса рідини, яка отримає коливальний рух;

D_n – діаметр поршня;

S_2 – площа насадка;

S_1 – площа поршня;

A_n – амплітуда коливання поршня;

$A_н$– амплітуда коливання рідини у насадку;

$P_{\max}$ – максимальний тиск у камері пульсації;

C_x – жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра.

Під час аналізу динамічної моделі використано наступні припущення: при коливаннях рідини діє закон нерозривності рідини (відсутній її розрив – кавітація), вплив температури на рідину не враховується, ураховується кількість вмісту розчиненого повітря. В дослідженнях будемо визначати максимальний тиск P_{max} у камері пульсації при ході поршня униз при куті повороту $\varphi = 0{,}25\pi$.

Як вказувалося раніше, основним критерієм ефективності процесу знезаражування і зміни властивостей рідини є величина максимального тиску у рідини при коливаннях робочого органу, тому необхідно визначити вплив на максимальний тиск рідини $P_{\max}$ у камері пульсації наступних параметрів вібраційної машини: f – частоти коливань віброприводу; $A_к$ – амплітуди коливань поршня; розмірів: $D_п$ – діаметра поршня; $d_н$ – діаметра насадка.

З першого рівняння системи (1) згідно з законом нерозривності рідини можна записати наступну залежність:

$$x = A_н = \frac{\varepsilon D_п^2 \cdot A_п}{d_н^2}, \tag{2}$$

де $A_н$ – амплітуда коливань рідини у насадку;
$A_п$ – амплітуда коливань поршня в камері пульсації;
$D_п$ – діаметр поршня;
$d_н$ – діаметр насадка;
ξ – коефіцієнт урахування звуження потоку рідини у насадку.

Тоді швидкість рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\dot{x} = \frac{\varepsilon D_п^2 \cdot A_п \cdot f}{d_н^2}, \tag{3}$$

де f – частота коливань віброприводу.

Прискорення рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\ddot{x} = \frac{\varepsilon D_п^2 \cdot A_п \cdot f^2}{d_н^2}. \tag{4}$$

Тоді друге рівняння (1) можна записати у наступному вигляді:

$$m\frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_н^2} f^2 + k\frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_н^2} f + c\frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_н^2} = \frac{\pi D_k^2}{4} P_{\max} \tag{5}$$

Провівши перетворення отримаємо наступне рівняння для визначення тиску:

$$m\frac{4}{\pi}\frac{\varepsilon A_k}{d_н^2} f^2 + k\frac{4}{\pi}\frac{\varepsilon A_k}{d_н^2} f + c\frac{4}{\pi}\frac{\varepsilon A_k}{d_н^2} = P_{\max} \tag{6}$$

Демпфуючу здатність поршня з отворами та жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності циліндра знайдемо за формулою:

$$k_x = \frac{8\pi D_п^4}{d_o^2}\mu \cdot l / d_N, \tag{7}$$

де μ – динамічний коефіцієнт густини, $\mu = 8{,}94 \cdot 10^{-4}$ $Па \cdot с$;
l – довжина отвору, $l = 0{,}045$ м;
d_N – кількість отворів $d_N = 1$.

Уявний модуль пружності рідини визначається за формулою Кортевича [11]. Звідки жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра знаходиться за залежністю:

$$c_x = \frac{E_{сум} + E \cdot \delta_k}{E \cdot \delta_k + D_п}, \tag{8}$$

де $E_{сум}$ – модуль об'ємної пружності газорідинної суміші;

E – модуль пружності матеріалу стінок циліндра; $(E = 2 \cdot 10^{11}\,Па)$;

δ_k – товщина стінок циліндра; $\delta_к = 5мм$;

$D_п$ – діаметр поршня.

Вплив вмісту розчиненого повітря на пружність рідини (води) дається Д.Н. Поповим [12] у вигляді:

$$E_{сум} = \frac{E_{рід}\left[1 + \frac{V_{пов}}{V_{рід}}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/k}\right]}{1 + \frac{E_{рід}V_{пов}}{kPV_{рід}}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/k}}, \tag{9}$$

де $E_{рід}$ – модуль об'ємної пружності рідини (для води $E_{рід} = 20 \cdot 10^8\,Па$);

$V_{пов}$ – об'єм повітря;

$V_{рід}$ – об'єм рідини;

p_0, p – абсолютні тиски, $p_0 = p_{атм}$;

k – показник адіабати (для повітря $k = 1{,}4$).

Рівняння (6) дозволяє оцінити вплив різних параметрів на величину тиску P_{max} при руху поршня униз (стискання рідини) зі зміною частоти пульсацій. За допомогою програмного продукту MtchCad були проведені розрахунки та побудовані графіки залежності величини тиску P_{max} у камері пульсації від частоти при зміні розміру діаметра насадка $d_н$ рис. 4, при зміні амплітуди коливань A рис. 5, при зміні розміру діаметра поршня $D_п$ рис. 6.

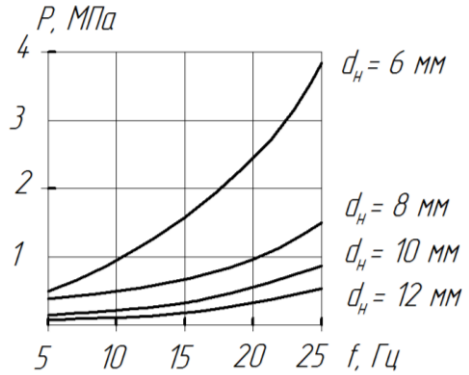


Рис. 4. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра насадка d : амплітуда коливань $A_п$ = 2 мм; діаметр поршня $D_п$ = 100 мм; маса рідини, що коливається m = 0,1 кг

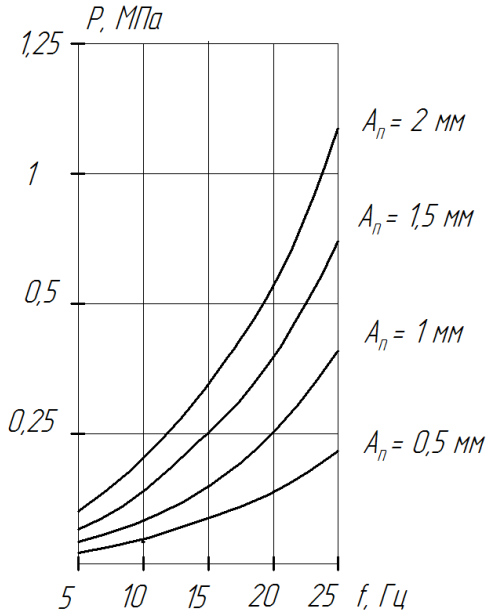


Рис. 5. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні амплітуди коливань $A_п$: діаметр поршня $D_п$ = 100 мм; діаметр насадка d = 10 мм; маса рідини, що коливається m = 0,1 кг

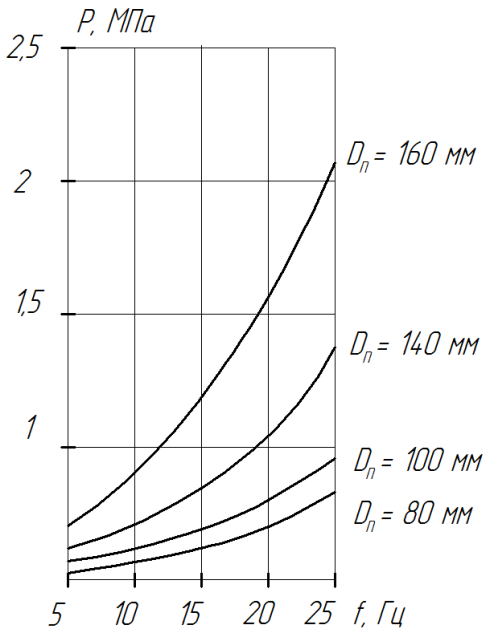


Рис. 6. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра поршня $D_п$: діаметр насадка d = 10 мм; амплітуда коливань $A_п$ = 2 мм; маса рідини, що коливається m = 0,1 кг

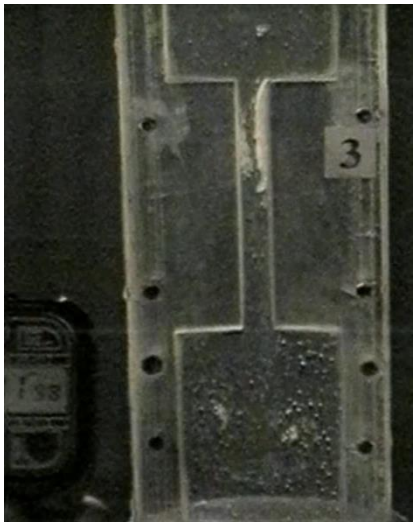


Рис. 7. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц

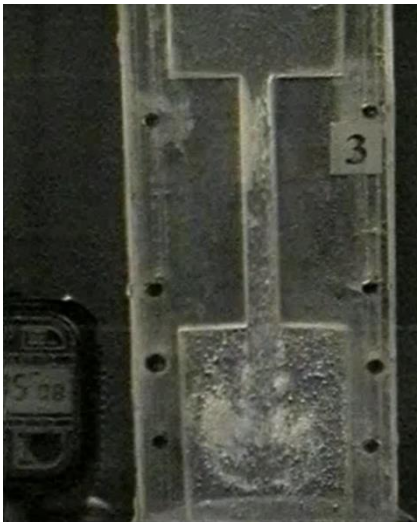


Рис. 8. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшення частоти коливань до 10 Гц

У результаті проведених аналітичних досліджень встановлено, що із збільшенням частоти коливань, діаметра поршня та амплітуди коливань максимальний тиск у камері пульсації зростає. Також встановлено, що при збільшені частоти коливань та зменшенні діаметра насадка максимальний тиск у камері пульсації зростає. Треба зазначити, що при збільшенні діаметра поршня будуть зростати інерційні параметри машини, що призведе до збільшення реактивної маси (основи машини), зростуть енергетичні витрати приводу. При зменшенні діаметра насадка, при певному діаметрі поршня, зменшиться виток рідини крізь насадок в наслідок чого знизиться продуктивність процесу знезаражування. Тому у подальших дослідженнях необхідно буде визначити оптимальні співвідношення конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу при отриманні максимального тиску у робочому органі вібраційної машини.

Для визначення реальної картини протікання рідини крізь насадок у коливальному режимі (з урахуванням виникнення кавітаційних процесів) було створену дослідну установку з прозорим каналом та проведена відеозйомка зворотно-поступального руху рідини у каналі для виявлення процесу виникнення кавітаційних процесів. Були отримані фотографії процесів, які виникають при проходження рідини крізь канал січенням 10х10 мм при коливаннях на різних частотах (від 0 до 24 Гц) з амплітудою 2 мм при діаметрі поршня 100 мм (рис. 7 – рис. 12)

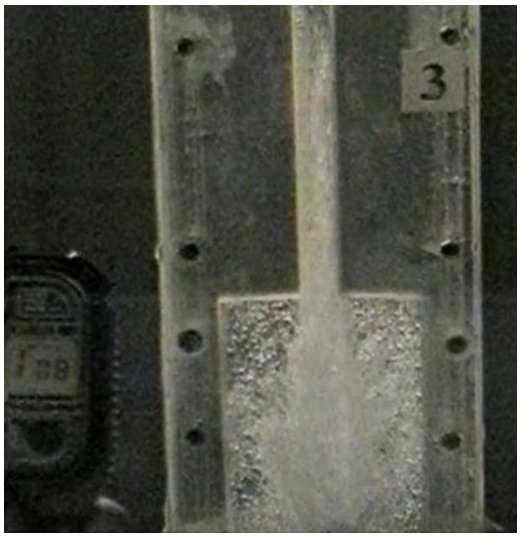


Рис. 9. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшення частоти коливань до 14 Гц

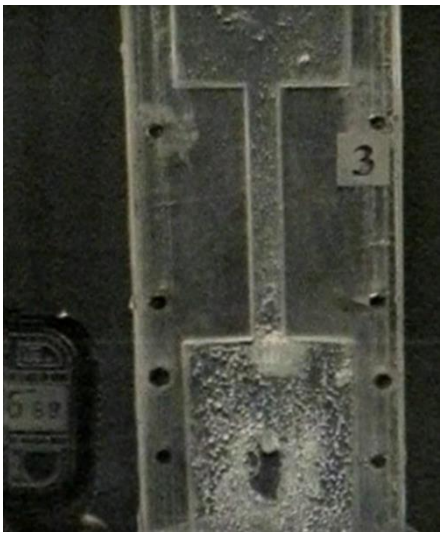


Рис. 10. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшення частоти коливань до 16 Гц; поява великої кавітаційної каверни

На початковому етапі у момент втягування рідини у камеру пульсації при частоті коливань 5Гц (рис. 7) спостерігається виникнення кавітаційної каверни при вході у канал та в камері пульсації з'являються кавітаційні пухирці. Із зростанням частоти до 10 Гц спостерігається значне зростання кількості кавітаційних пухирців та збільшення їх розмірів (рис. 8). Із зростанням частоти до 14 Гц відбувається зрив кавітаційної каверни при вході у канал, спостерігається рух кавітаційних пухирців у камеру пульсації (рис.9). Із зростанням частоти до 16 Гц спостерігається виникнення у камері пульсації поява великої кавітаційної каверни у наслідок розриву рідини по границях пухирців.

На етапі руху рідини уверх рис 11. та рис. 12 спостерігається каверна вході у канал з іншої сторони каналу (рис. 11) та спостерігається збільшення її розмірів із збільшенням частоти коливань, а у камері пульсації спостерігаються газові пухирці, які не сплеснулися, а газ у них стиснено, що відігріває негативну функцію – збільшення об'ємної пружності рідини у камері пульсації, що веде до зменшення об'єму рідини, що виштовхується (зменшується виток крізь канал, відповідно зменшується продуктивність процесу знезаражування).

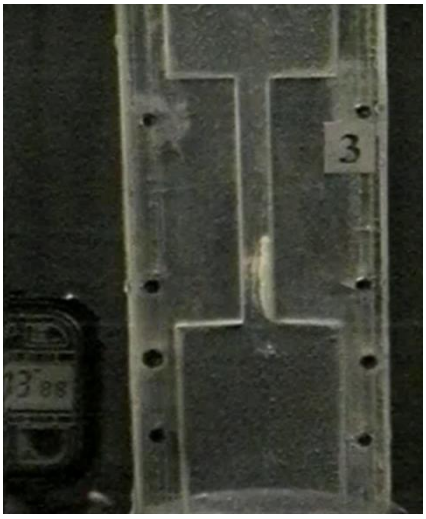


Рис. 11. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент виштовхування рідини у насадок виникнення кавітаційної каверни та сплескування кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц

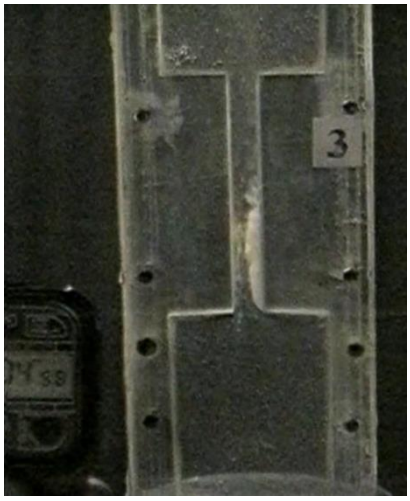


Рис. 12. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшення частоти коливань до 10 Гц

У результаті проведених досліджень з візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь канал встановлено, що залежно від частоти та амплітуди коливань і варіації конструктивних параметрів робочого органу у рідині виникають кавітаційні процеси: при ході поршня уверх створюється зниження тиску у камері пульсацій та поява кавітаційних каверн при вході у верхній частині каналу, а у камері пульсацій спостерігається зростання кількості кавітаційних пухирців та їх розмірів; при ході поршня униз спостерігається поява кавітаційних каверн при вході у нижній частині каналу, а у камері пульсації проходить сплескування кавітаційних пухирців але незначна кількість газонаповнених пухирців тільки стискаються до певних розмірів і вони виштовхуються з камери пульсації крізь канал. Наявність такої пружної фази зменшує величину витоку рідини крізь канал. Тому у подальших дослідженнях планується провести експериментальне дослідження по визначенню фактичної зміни тиску у камері пульсації при зміні режимів роботи приводу та конструктивних параметрів робочого органу з урахуванням кавітаційних процесів при зворотно-поступальному протіканні рідини крізь насадок.

Висновки

1. Встановлено, що зі збільшенням частоти коливань поршня зростає тиск у камері робочого органу завдяки збільшенню швидкості перетікання рідини у насадок з виникненням ефекту гідравлічного удару.

2. Результати аналізу аналітичної моделі показали значне зростання максимального тиску при збільшенні амплітуди коливань, але за великих амплітуд (більше 2,5 мм) значно зростають інерційні параметри приводу. Це може призводити до виникнення паразитних коливань та швидкого зношування елементів приводу.

3. Зростання максимального тиску при зменшені діаметра насадка має різні наслідки: з однієї сторони зростання максимального тиску, що призводить до руйнування мікробів, а з іншої – зменшення витоку рідини крізь насадок, що призводить до падіння продуктивності процесу.

4. Дослідження по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь насадок показали, що вже при незначних максимальних тисках проявляється ефект появи кавітаційних каверн, кавітаційного росту та сплескування газових пухирців повітря, яке розчинено у воді.

5. Виходячи з вище сказаного є необхідність провести експериментальні дослідження з вимірювання дійсного максимального тиску в обладнанні та встановлення оптимальних параметрів приводу: частоти та амплітуди коливань, розмірів поршня та насадка їх співвідношення.

Література

1. Сілін Р.І. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 3. – С. 253–257.

2. Сілін Р.І. Науково-технічні основи розроблення вібромашин для впливу на властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4(56) – С. 141–148.

3. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних хімічних і біологічних процесах : монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль, 2009. – 224 с.

4. Шевчук Л.І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвід. наук.-техн. зб. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 45. – С. 374–380.

5. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори : монографія / [Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський]. – Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2013. – 173 с.

6. Пат. на корисну модель № 101525 України. МПК B01F 3/00. Гідродинамічний струменевий кавітатор / Яворський В.Т., Сухацький Ю.В., Мних Р.В., Оленич Р.Р., Курилець О.Г. ; Національний університет «Львівська політехніка». – № u 2015 01762 ; заяв. 27.02.2015 ; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18. – 3 с.

7. Сілін Р.І. Властивості води та сучасні способи її очищення : монографія / Р.І. Сілін, Б.А. Баран, А.І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – 254 с., іл.

8. Патент на корисну модель № 94358 України, МПК B01F 5/00. Вібраційний кавітатор поршневого типа для активації рідини та її знезаражування / Сілін Р.С., Гордєєв А.І., Копицяк О.А. (Україна) ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2014 05860 ; заяв. 30.05.2014 ; опубл.10.11.2014. Бюл. № 21. – 4 с.

9. Пат. на корисну модель 116031 України, МПК C02F 9/00. Пристрій для гідрокавітаційного знезаражування води / Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А. Мігаль В.Г. Ганзюк А.Л. (Україна) ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2016 10060 ; заяв. 03.10.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.

10. Пат. на корисну модель № 126495 України. МПК C02F 1/00. Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк. – № u 2018 10090 ; заяв. 02.01.2018 ; опубл. 25.08.2018, Бюл. № 12. – 6 с.

11. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М. : Издательство литературы по строительству, 1965. – 274 с., ил.

12. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы / Д.Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1982. – 240 с., ил.

References

1. Silin R.I., HordeevA.I., V.V. Tretko V.V., Soroka I.I. Cavitation treatment and its effect on water composition. Bulletin of Technology University of Podillia. № 3. 2002. pp. 253–257.

2. Silin R.I., Hordeev A.I. Scientific and technical bases of development of vibration machines for influence on water properties. Vibrations in Engineering and Technology. 2009. No. 4 (56) pp. 141–148.

3. Vitenko T.M. Hydrodynamic cavitation in mass-exchange chemical and biological processes: monograph. Ternopil, 2009. 224 p.

4. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I. Vibrating electromagnetic cavitator of resonant action. Automation of production processes in mechanical engineering and instrumentation. Ukrainian Intermediate. scientific-technical Sat. Nat. University of Lviv Polytechnic. No. 45. 2011. pp. 374–380.

5. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I., Starchevsky V.L. Low-frequency vibration resonance cavitators: a monograph. Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic. 2013. 173 p.

6. Pat. for utility model № 101525 of Ukraine. IPC B01F 3/00. Hydrodynamic Inkjet Cavitator. Yavorsky V.T., Suhatsky Y.V., Mnykh R.V., Olenich R.R., Kurilets O.G. Lviv Polytechnic National University; № in 2015 01762; applications 27.02.2015; publ. 9/25/2015, Bul. № 18. 3 p.

7. Silin R.I., Baran B.A., Hordeev A.I. Water properties and modern methods of its purification: monograph. Khmelnitsky: KhNU, 2009. 254 p.

8. Patent for utility model. No. 94358 of Ukraine, IPC B01F 5/00. Piston type vibrating cavitator for fluid activation and decontamination. Silin R.S, Hordeev A.I., Kopytsyak O.A. (Ukraine); applicant and patentee Khmelnitsky Nat. Univ. in 2014 05860; Statement 05/30/2014 Posted on 10/11/2014. Bul. № 21. 4 p.

9. Pat. for utility model 116031 of Ukraine, IPC C02F 9/00. Device for hydrocavitation water disinfection. Silin R.I., Hordeev A.I., Hordeev O.A. Migal V.G. Ganziuk A.L. (Ukraine); applicant and patentee Khmelnitsky Nat. Univ. in 2016 10060; Statement 03.10.2016; Publ. 10/05/2017, Bul. № 9. 4 p.

10. Pat. for utility model №126495 of Ukraine. IPC C02F 1/00. Vibrating machine for decontamination of aquatic environments / A.I. Hordeev, N.O. Kostyuk; No. in 2018 10090; applications 02.01.2018; publ. 08/28/2018, Bul. № 12. 6 s.

11. Altshul A.D., Kiselev P.G. Hydraulics and aerodynamics (fundamentals of fluid mechanics). M.: Publishing House of Literature on Construction, 1965. 274 p.

12. Popov D.N. Non-stationary hydromechanical processes. M.: Mechanical Engineering, 1982. 240 p.

Рецензія/Peer review: 11.12.2019 Надрукована/Printed: 12.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Харжевський В.О.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-44-48
УДК 621.318

Ю.В. БАТЫГИН, С.А. ШИНДЕРУК, Е.А. ЧАПЛЫГИН,
Е.Ф. ЕРЁМИНА, Б.В. БОРИСЕНКО
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ВНЕШНИМ БИФИЛЯРНЫМ СОЛЕНОИДОМ. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрена физико-математической модель предложенной индукторной системы и проведен теоретический анализ протекающих в ней электромагнитных процессов. Получены численные оценки характеристик возбуждаемых полей, что позволяет обосновать практическую дееспособность рассматриваемой системы. Результаты исследований могут быть использованы при формировании новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

Ключевые слова: индукторная система, электромагнитные процессы, индуцированный ток, магнитно-импульсная обработка.

YU.V. BATYGIN, S.A. SHINDERUK, E.A. CHAPLYGIN, E.F. YERYOMINA, B.V. BORISENKO
Kharkiv National Automobile and Highway University

CYLINDRICAL INDUCTOR SYSTEM WITH EXTERNAL BIFILAR SOLENOID. ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES

The purpose of this work is a theoretical analysis and assessment of the electromagnetic processes characteristics in the proposed inductor system with an external bifilar solenoid. The obtained numerical estimates of the excited current dependences allow us to justify the practical applicability of the investigated inductor system. The radial and longitudinal dependences of the current induced in the inductor metal are calculated. It is shown that under the accepted conditions the time functions of the induced and exciting current are the same. It is established that in the longitudinal distribution of the induced current there is no constant component, which leads to a change in the corresponding integral dependence in comparison with the distribution of the excitation current. The decrease in the amplitude of the induced current occurs with a relative increase in the period of the bifilar winding. The smallest magnitude of the induced current should be observed at a sufficiently small difference between the radial dimensions of the internal inductor, the first and second windings of the bifilar, which is practically possible in inductor systems with sufficiently large transverse dimensions. Scientific novelty consists in proposing the idea of constructive design of the inductor system, its physical and mathematical model, analysis of the electromagnetic processes taking place with numerical estimates of the dependences of the excited current, which allows substantiating the practical operability of the investigated inductor system. The obtained numerical estimates of the dependences of the excited current allow substantiating the practical applicability of the studied inductor system. A very promising area for further research is an experimental study of electromagnetic processes in the proposed design of an inductor system with external bifilar coils. The research results can be used in the selection of working design solutions for the corresponding elements of new circuits of equipment for magnetic pulse metal processing.

Keywords: inductor system, electromagnetic processes, induced current, magnetic pulse processing.

Введение

Бифилярной является катушка, намотанная двумя параллельными проводами, расположенными рядом друг с другом на одном общем каркасе, и изолированными друг от друга на всем протяжении намотки. В зависимости от назначения бифиляра токи в параллельных проводах обмотки могут иметь одинаковые или разные направления. В первом случае вне намоток возбуждаемые магнитные потоки складываются, что приводит к увеличению результирующего поля. Во втором случае вне намоток возбуждаемые магнитные потоки вычитаются, что в итоге ведёт к уменьшению результирующего поля, что, в конечном итоге, означает снижение величины индуктивности катушки, как элемента электрического контура.

Анализ публикаций и постановка задачи

Впервые термин «бифилярная катушка» упоминается Николой Тесла в патенте США [1]. Своё изобретение автор использовал для питания эффективных источников света, для передачи энергии на расстояние без проводов и др. [2]. В современной электротехнике бифилярные конструкции используют в качестве малоиндуктивных проволочных резисторов, в схемах генерации магнитных импульсов любой формы и длительности, в радиотехнических устройствах с целью повышения их рабочих показателей, в сверхпроводящих электротехнических устройствах и др. [3–5]. Развитию численных и аналитических методов расчёта электромагнитных процессов в соленоидах разной геометрии, получивших широкое применение в качестве источников сильных электромагнитных полей, посвящены работы [6, 7].

Для схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов представляют практический интерес исследования систем, в которых бифилярные катушки размещаются либо внутри, либо поверх многовитковых цилиндрических индукторов. Использование таких конструктивных дополнений позволяет снизить рассеяние электромагнитной энергии без влияния на процессы в инструментах силового воздействия [7]. Авторами [8] впервые предложена индукторная система с бифиляром, размещённым поверх собственно индуктора, и получены расчётные выражения для полей и токов, позволяющие проанализировать действенность предложения на основе найденных расчётных данных.

Цель настоящей работы – теоретический анализ и оценка характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической системе, где индуктор размещён внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами.

Научная новизна состоит в предложении идеи конструктивного исполнения собственно индукторной системы, её физико-математической модели, проведении анализа протекающих электромагнитных процессов с численными оценками характеристик возбуждаемых полей, что позволяет обосновать практическую дееспособность исследованной индукторной системы.

Анализ протекающих процессов, численные оценки

Для решения поставленной задачи выпишем из работы [8] все необходимые аналитические зависимости. Кроме того, для ясности в изложении приведем физико-математическую модель предложенной индукторной системы, схема которой представлена на рис. 1, и основные допущения, определяющие состояние системы и границы применимости полученных расчётных соотношений.

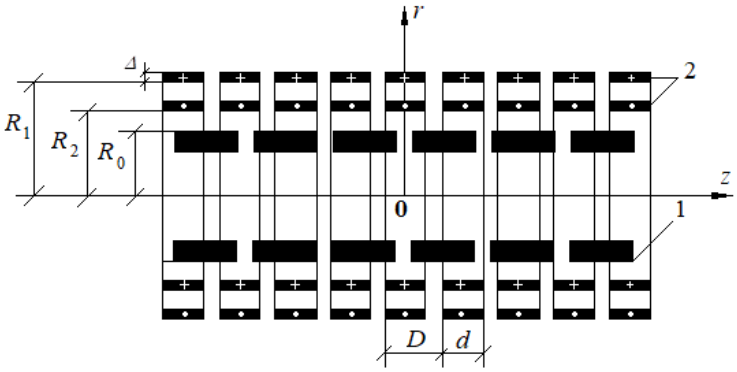


Рис. 1. Расчётная модель индукторной системы с внешней бифилярной обмоткой

Состояние исследуемой системы. Внутренний индуктор отключён, его витки выполнены из металла с высокой электропроводностью и достаточно плотно прилегают друг к другу, так что их внешнюю поверхность радиуса R_0 можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника.

В продольном направлении бифилярная обмотка представляет собой периодическую структуру, где D – шаг намотки, d – ширина витков, Δ – толщина витков бифиляра. Витки бифилярной обмотки из металлической ленты (R_1, R_2 – радиусы внутренней и внешней её частей) не влияют на протекающие электромагнитные процессы, так как они «прозрачны» для возбуждаемых полей. Бифиляр возбуждается гармоническим током с амплитудно-временной зависимостью $j_\varphi(t) = j_m \cdot \sin(\omega t)$, где j_m – амплитуда линейной плотности возбуждающего тока, ω – циклическая частота, t – время.

В конечном итоге, основной практический интерес представляет ток, индуцированный в металле внутреннего индуктора-соленоида. Его величина определяет влияние внешнего бифиляра на электромагнитные процессы в рассматриваемой индукторной системе. В этой связи ограничимся выражением для индуцированного тока, которое, сохранив все обозначения, выпишем из работы [8].

$$j_i(p,z) = H_z(p, r = R_0, z) = -\, j_m \cdot \frac{1}{R_0} \cdot \left(\frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\Omega_n \cdot z) \cdot M_n(R_{1,2}) \cdot V_n(R_0), \quad (1)$$

где p – параметр преобразования Лапласа; $\Omega_n = \frac{2\pi}{D} \cdot n$;

$$a_n^* = \begin{cases} \frac{d}{D}, & n = 0, \\ \frac{2}{\pi n} \cdot \sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right), & n = 1, 2, 3..... \end{cases}$$

$$M_n(R_{1,2}) = R_1 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_1) - R_2 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_2),$$

$$V_n(R_0) = \frac{1}{K_1(k_n(p) \cdot R_0)},$$

$K_1(k_n(p) \cdot R_{0,1,2})$ – функция Бесселя второго рода первого порядка [9],

$$k_n(p) = \sqrt{\Omega_n^2 + k^2(p)}, \; k(p) = \left(\frac{p}{c}\right),$$

c – скорость света в вакууме.

Выражение (1) преобразуем к виду, удобному для анализа и вычислений.

В сумме по пространственным гармоникам Ω_n выделим первое слагаемое, определяющее постоянную среднюю величину возбуждаемого тока на периоде по продольной пространственной переменной z. Итак, при $n = 0$ из (1) находим, что

$$\overline{j_i}(p) = -\, j_m \cdot \frac{d}{2D \cdot R_0}\left(\frac{\omega}{p^2+\omega^2}\right)\frac{R_1 \cdot K_1\left(k(p)\cdot R_1\right) - R_2 \cdot K_1\left(k(p)\cdot R_2\right)}{K_1\left(k(p)\cdot R_0\right)}. \quad (2)$$

В реальном для магнитно-импульсной обработки металлов диапазоне рабочих частот $\left|k(p)\cdot R_{0,1,2}\right| << 1$ [7]. Данная оценка позволяет воспользоваться представлением модифицированных функций Бесселя для достаточно малых значений аргументов в виде обратно пропорциональных зависимостей $K_1 \approx \frac{1}{k(p)\cdot R_{0,1,2}}$ [9]. В этом случае зависимость (2) допускает следующую оценку:

$$\overline{j_i}(p) \approx -\, j_m \cdot \frac{d}{2D}\cdot\left(\frac{\omega}{p^2+\omega^2}\right)k(p)\cdot\left(R_1 \cdot \frac{1}{k(p)\cdot R_1} - R_2 \cdot \frac{1}{k(p)\cdot R_2}\right) = 0. \quad (3)$$

Результат (3) свидетельствует об отсутствии постоянной составляющей индуцированного тока вдоль продольной пространственной переменной z. С учётом (3) зависимость (1) можно упростить:

$$j_i(p,z) = -\, j_m \cdot \frac{1}{R_0}\cdot\left(\frac{\omega}{p^2+\omega^2}\right)\cdot\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\Omega_n \cdot z\right)\cdot M_n\left(R_{1,2}\right)\cdot V_n\left(R_0\right), \quad (4)$$

где $a = \frac{2}{\pi n}\cdot\sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right),\ n = 1,2,3.....$

$$M_n\left(R_{1,2}\right) = R_1 \cdot K_1\left(\Omega_n \cdot R_1\right) - R_2 \cdot K_1\left(\Omega_n \cdot R_2\right), \quad V_n\left(R_0\right) = \frac{1}{K_1\left(\Omega_n \cdot R_0\right)}.$$

В реальном для магнитно-импульсной обработки металлов диапазоне рабочих частот $\left|k(p)\cdot R_{0,1,2}\right| << 1$ [7]. Данная оценка позволяет воспользоваться представлением модифицированных функций Бесселя для достаточно малых значений аргументов в виде обратно пропорциональных зависимостей $K_1 \approx \frac{1}{k(p)\cdot R_{0,1,2}}$ [9]. В этом случае зависимость (2) допускает следующую оценку:

$$\overline{j_i}(p) \approx -\, j_m \cdot \frac{d}{2D}\cdot\left(\frac{\omega}{p^2+\omega^2}\right)k(p)\cdot\left(R_1 \cdot \frac{1}{k(p)\cdot R_1} - R_2 \cdot \frac{1}{k(p)\cdot R_2}\right) = 0. \quad (3)$$

Результат (3) свидетельствует об отсутствии постоянной составляющей индуцированного тока вдоль продольной пространственной переменной z.

С учётом (3) зависимость (1) можно упростить. Получим, что

$$j_i(p,z) == -\, j_m \cdot \frac{1}{R_0}\cdot\left(\frac{\omega}{p^2+\omega^2}\right)\cdot\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\Omega_n \cdot z\right)\cdot M_n\left(R_{1,2}\right)\cdot V_n\left(R_0\right), \quad (4)$$

где $a = \frac{2}{\pi n}\cdot\sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right),\ n = 1,2,3.....$

$$M_n\left(R_{1,2}\right) = R_1 \cdot K_1\left(\Omega_n \cdot R_1\right) - R_2 \cdot K_1\left(\Omega_n \cdot R_2\right), \quad V_n\left(R_0\right) = \frac{1}{K_1\left(\Omega_n \cdot R_0\right)}.$$

Для реально возможной геометрии рассматриваемой индукторной системы $\Omega_n \cdot R_{0,1,2} = 2\pi n \cdot \frac{R_{0,1,2}}{D} >> 1$ [7], что позволяет воспользоваться экспоненциальной асимптотикой для модифицированных функций Бесселя $K_1\left(\Omega_n \cdot R_{0,1,2}\right) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\cdot\left(\Omega_n \cdot R_{0,1,2}\right)}}\cdot e^{-\left(\Omega_n \cdot R_{0,1,2}\right)}$ [9].

После обратного преобразования Лапласа, выполнения необходимых тождественных преобразований и раскрытия ранее принятых обозначений из (4) получаем пространственно-временную зависимость для тока, индуцированного в металле внутреннего соленоида [9].

С нормировкой на плотность возбуждающего тока полученный результат запишется в виде:

$$j_0(t,z) = \frac{j_i(t,z)}{j_m} \approx \frac{2}{\pi}\cdot\sin(\omega \cdot t)\cdot\sqrt{\frac{R_1}{R_0}}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right)}{n}\cdot\cos\left(2\pi n \cdot \frac{z}{D}\right)\times$$
$$\times e^{-\left(2\pi n \cdot \frac{(R_1 - R_0)}{D}\right)}\cdot\left(1 - \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\cdot e^{-\left(2\pi n \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{D}\right)}\right). \quad (5)$$

Непосредственно из (5) следует, что

– временные функции индуцированного и возбуждающего токов одинаковы, что согласуется с известными выводами [6, 7, 10];

– отсутствие постоянной составляющей в пространственном распределении индуцированного тока приводит к изменению соответствующей зависимости в сравнении с возбуждающим током;

– наименьшая величина индуцированного тока (нулевая!) должна иметь место при $R_0 \approx R_1 \approx R_2$, что практически возможно в индукторных системах с достаточно большими поперечными размерами;

– снижение амплитуды индуцированного тока происходит при относительном увеличении периода обмотки, что практически соответствует увеличению продольного расстояния относительно радиальных зазоров между витками бифиляра $\left(\frac{D}{R_1 - R_0} > 1,\ \frac{D}{R_2 - R_1} > 1\right)$.

От качественных идеализаций перейдём к численным оценкам.

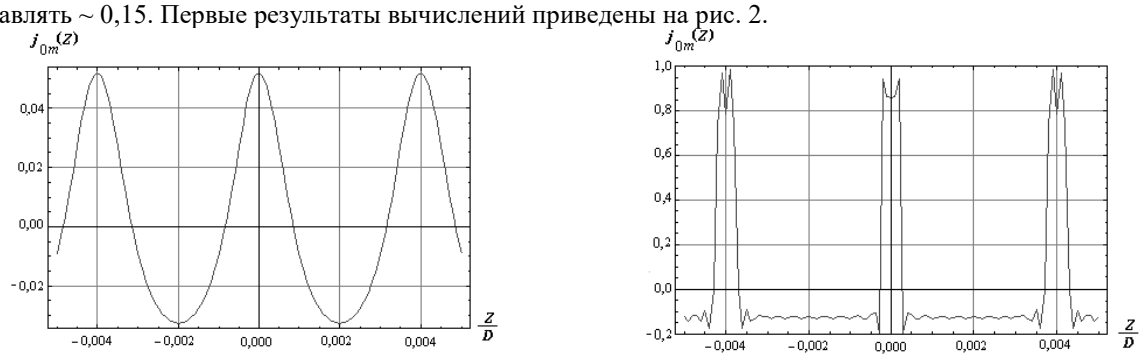
В качестве примера возьмём один из вариантов экспериментальной модели исследованной индукторной системы с плотной намоткой по радиусу, но в продольном направлении витки разделены дополнительной изоляционной прокладкой для увеличения периода повторения D:

а) радиальные размеры, $R_0 = 0,0375$ м, $R_1 = 0,0385$ м, $R_2 = 0,0395$ м;

б) продольные размеры, $d = 0,0005$ м, $D = 0,004$ м;

в) величина изоляционных покрытий, $h = 0,0005$ м.

Примечание. Принятая величина периода повторения в обмотке бифиляра по продольной координате позволяет удовлетворить условию достаточной радиальной тонкостенности металла витков из меди. Последнее обстоятельство объясняется большей удалённостью второй обмотки по сравнению с первой относительно рабочей поверхности внутреннего индуктора. Как показывают соответствующие численные оценки, их усреднённая поперечная толщина в отношении к величине скин-слоя будет составлять ~ 0,15. Первые результаты вычислений приведены на рис. 2.

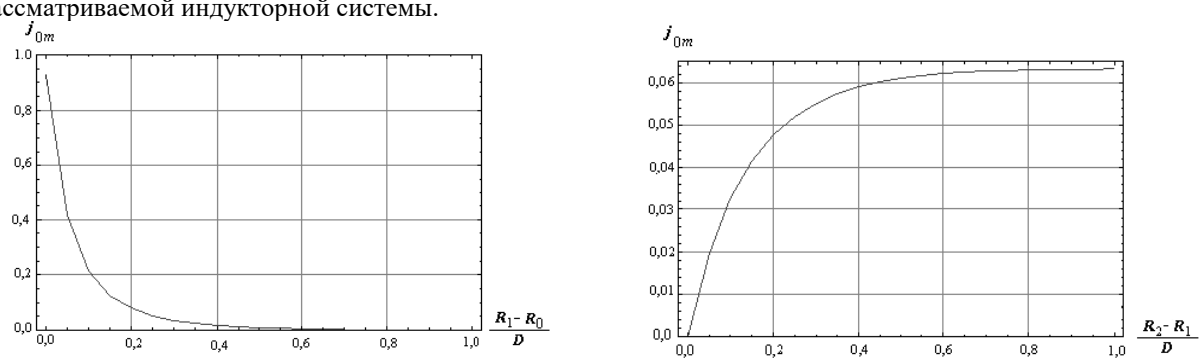


а б

Рис. 2. Иллюстрации продольного распределения временного максимума плотности индуцированного тока а) реальная экспериментальная модель, б) идеализация, в которой $R_1 \to R_0$ и $R_2 >> R_1$

При увеличении расстояния между обмотками (рис. 2б) величина индуцированного тока существенно возрастает, осциллирующий характер зависимости от продольной координаты сохраняется. Но, как и прежде, амплитуды отрицательных значений меньше положительных амплитуд. Как следует из рис. 2а, продольное распределение индуцированного тока в реальной конструкции есть близким к гармонической зависимости, хотя амплитуды отрицательных меньше амплитуд положительных осцилляций. Последнее обстоятельство объясняется большей удалённостью второй обмотки по сравнению с первой относительно рабочей поверхности внутреннего индуктора.

Графические иллюстрации на рис. 3 описывают количественные зависимости относительных величин плотности тока, возбуждаемого на поверхности внутреннего соленоида, от поперечных размеров рассматриваемой индукторной системы.



а б

Рис. 3. Зависимости максимальных временных и продольных амплитуд плотности индуцированного тока от радиальных характеристик: а) при $\frac{R_2 - R_1}{D} = 0,25$; б) при $\frac{R_1 - R_0}{D} = 0,25$

Математический характер расчётных зависимостей легко объяснить физикой протекающих процессов. Так, функция на рис. 3а убывает вследствие удаления первой обмотки (и, соответственно, второй) относительно внутреннего соленоида (то есть, падает уровень электромагнитной связи). Функция на рис. 3б возрастает, поскольку удаляется вторая обмотка, первая сохраняет своё положение в системе, и падает пространственно-временное взаимодействие их полей (то есть, эффект бифиляра).

Окончательной численной характеристикой исследованной индукторной системы можно считать максимальную нормированную величину индуцированного тока, равную ~ 6,3% относительно амплитуды возбуждающего тока в обмотках бифиляра.

Выводы

Полученные результаты можно обобщить следующими положениями. Проведен теоретический анализ и оценка характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической системе, где индуктор размещён внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами. Показано, что в $z-$распределении тока, индуцированного в металле внутреннего индуктора, отсутствует постоянная составляющая, что приводит к изменению соответствующей интегральной зависимости по координате z в сравнении с соответствующим распределением возбуждающего тока. Показано, что наименьшая величина индуцированного тока (нулевая) должна иметь место при достаточно малой разнице между радиальными размерами внутреннего индуктора, первой и второй обмоток бифиляра ($R_0 \approx R_1 \approx R_2$), что практически возможно в индукторных системах с достаточно большими поперечными размерами. Численные оценки для экспериментальной модели индукторной системы показали, что индуцированный ток в процентном отношении к величине возбуждающего тока не превышает ~ 6,3%.

Полученные результаты будут использованы при выборе рабочих конструкторских решений для соответствующих элементов новых схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов. Весьма перспективным в направлении дальнейших исследований видится экспериментальное изучение электромагнитных процессов в предложенной конструкции индукторной системы с внешними бифилярными катушками, что является весьма интересным для формирования новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

Литература

1. Pat. 512.340 US. Coil for electro-magnets / N. Tesla. – Serial No. 479.804; application filed July 7, 1893; patented Jen. 9, 1894.

2. Тесла Н. Лекции и статьи / Никола Тесла. – М. : Изд. «Tesla Print», 2003. – 386 с.

3. Герасимов В. Г. Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи / В. Г. Герасимов, Э. В. Кузнецов, О. В. Николаева. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 288 с.

4. Пат. 2355060, Росийская Федерация, МПК H01F 5/00 Катушка / В. П. Янчук. – № 2007111425/09 ; заявл. 28.03.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.

5. Ahn M. C., Bae D. K., Yang S. E., Park D. K., Ko T. K., Lee C., Seok B.-Y., Chang H.-M. Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor. *IEEE Trans. Applied Supercondactivity*. 2006. Vol. 16, Issue 2, pp. 646–649.

6. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К. : Изд. Института электродинамики НАНУ. 1999. – 362 с.

7. Батыгин Ю. В. Цилиндрическая индукторная система с внешним бифилярным соленоидом. Расчётные соотношения / Ю. В. Батыгин, С. А. Шиндерук, Е. А. Чаплыгин, А. А. Коряк, А. В. Довгий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 5. – С. 13–18.

8. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

9. Яворский Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. – М. : Оникс, 2006. – 1056 с.

References

1. Pat. 512.340 US. Coil for electro-magnets / N. Tesla. – Serial No. 479.804; application filed July 7, 1893; patented Jen. 9, 1894.

2. Tesla N. Lekcii i stati / Nikola Tesla. – M. : Izd. «Tesla Print», 2003. – 386 s.

3. Gerasimov V. G. Elektrotehnika i elektronika. Elektricheskie i magnitnye cepi / V. G. Gerasimov, E. V. Kuznecov, O. V. Nikolaeva. – M. : Energoatomizdat, 1996. – 288 s.

4. Pat. 2355060, Rosijskaya Federaciya, MPK H01F 5/00 Katushka / V. P. Yanchuk. – № 2007111425/09 ; zayavl. 28.03.2007 ; opubl. 10.05.2009, Byul. № 13.

5. Ahn M. C., Bae D. K., Yang S. E., Park D. K., Ko T. K., Lee C., Seok B.-Y., Chang H.-M. Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor. IEEE Trans. Applied Supercondactivity. 2006. Vol. 16, Issue 2, pp. 646–649.

6. Podolcev A. D. Elementy teorii i chislennogo raschyota elektromagnitnyh processov v ferromagnitnyh sredah / A. D. Podolcev, I. N. Kucheryavaya. – K. : Izd. Instituta elektrodinamiki NANU. 1999. – 362 s.

7. Batygin Yu. V. Cilindricheskaya induktornaya sistema s vneshnim bifilyarnym solenoidom. Raschyotnye sootnosheniya / Yu. V. Batygin, S. A. Shinderuk, E. A. Chaplygin, A. A. Koryak, A. V. Dovgij // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 5. – S. 13–18.

8. Korn G. Spravochnik po matematike / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1973. – 831 s.

9. Yavorskij B. M. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov VUZov / Yavorskij B. M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. – M. : Oniks, 2006. – 1056 s.

Рецензія/Peer review : 26.09.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Подригало М.А.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-49-52
УДК 677.016

Л.В. ПЕЛИК, О.В. ОСТАПЧУК, Ю.А. ПЕЛЕХ
Львівський торговельно-економічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ТРИВКОСТІ НАБИВНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕФЕКТОМ СУБЛІМАЦІЇ

В статті представлена доцільність застосування сублімаційного друку у виготовленні одягу, декоруванні інтер'єрів, в меблевому виробництві, виготовленні рекламної продукції та ін. На основі якісного аналізу структур текстильних матеріалів проведено дослідження ступеня тривкості матеріалів різних за волокнистим складом з нанесеним малюнком за допомогою технології сублімації. Зображення поверхні текстильних матеріалів, отриманих за допомогою сублімаційного друку, дозволяють якісно і точно відтворювати будь-які рисунки.

Ключові слова: ступінь тривкості, сублімаційний друк, термодрукування.

L.V. PELYK, O.V. OSTAPCHUK, Y.A. PELEH
Lviv University of Trade and Economics

RESEARCH DEGREE OF SUBSCRIPTION OF FILLED TEXTILE MATERIALS

The article presents the expediency of the use of sublimation printing in the manufacture of clothing, interior decoration, furniture production, production of advertising products, etc. Thermal printing involves two main processes: printing a drawing on paper and transferring a pattern from paper to fabric. To transfer ink from paper to fabric use the effect of sublimation: the dye at a certain temperature goes from the solid state directly into the gaseous, penetrating deep into the structure of the material and fixed there. In this case, the adsorption of the dye molecules on the surface first occurs, and then their diffusion into the fibers and interaction with the active centers of the fibers. On the basis of qualitative analysis of the structures of textile materials, the degree of durability of materials of different fiber composition with the applied pattern by means of sublimation technology was investigated. It is investigated that the indicator of the degree of durability of dyeing to wet friction, decreases due to the presence on the tested textile materials of the drugs used in the final decoration. It has been found that the surface density and thickness of the fabric have a decisive influence on the degree of colour durability. It was found that with increasing the density of filaments, thickness and surface density in textile materials, the degree of dye durability increases. Images of the surface of textile materials obtained by means of sublimation printing allow you to accurately and accurately reproduce any drawings.

Keywords: degree of durability, sublimation printing, thermal printing.

Вступ

Сучасні тенденції створення набивних текстильних матеріалів пов’язані із новими напрямками технологій їх виробництва з різних видів сировини та процесу їх колорування, що здійснюється в основному у виробничих умовах. Існує два види колорування текстильних матеріалів – це фарбування і друкування (друк). Фарбування текстильних матеріалів (волокон, пряжі, тканин, трикотажу) – це процес додання забарвлення цим матеріалам. Фарбування текстилю може проводитися на різних етапах його виробництва. Більш цікавим способом колорування є друкування (нанесення рисунка на поверхню білої або забарвленої тканини), пов’язане з імітацією вишитих і ткацьких узорів. Сьогодні особливості набивної тканини є показником якості й точності відтворення рисунка, ретельності опорядження. Технологією опорядження текстилю займалися відомі учені: Г. Кричевський, Ф. Садів, Б. Мельников, М. Корчагін, А. Матецький та ін. [1].

Оздоблення тканини надає їй необхідний вид і певні властивості, які потрібні для різних сфер застосування. Текстильні матеріали проходять оброблення абсолютно різними способами. Текстильний ринок приголомшує своєю надзвичайною різноманітністю видового асортименту. Якість сучасних тканин стала в кілька разів вище, ніж це було раніше. Це все стало можливим завдяки появі різноманітних способів оброблення.

На ринку оздоблення на текстильних матеріалах широке застосування знайшла технологія сублімації. Дана технологія може бути застосована у виготовленні одягу, декоруванні інтер'єрів, в меблевому виробництві (декорування оббивних тканин), виготовленні рекламної продукції (прапори, розтяжки, намети та ін.). Друк сублімації – це спосіб створення зображення за допомогою спеціальних чорнил, під впливом високої температури та рівномірного тиску.

Постановка завдання. Метою статті було дослідження ступеня тривкості текстильних матеріалів різних за волокнистим складом з нанесеним малюнком за допомогою технології сублімації.

Результати досліджень

Друкування тканин – це технологічний процес текстильного виробництва, при якому або фарбують тканину лише на окремих її ділянках (місцеве фарбування), або фарбують всю поверхню, але різними за кольором або відтінком барвниками. Розрізняють чотири види друкування: пряме, накладне, витравне і резервне. Залежно від площі, яку займає малюнок, матеріали поділяються на білоземельні, в яких

кольоровий малюнок займає не більше 40% площі матеріалу; напівґрунтові – з площею малюнка 40–60%; ґрунтові – колірний фон займає більше 60% площі.

При прямому друкуванні фарбу наносять безпосередньо на матеріал. При накладному друкуванні фарбу наносять на заздалегідь забарвлений в світлі тони матеріал. Витравне друкування дозволяє отримати малюнок шляхом нанесення на гладкофарбовану тканину витравки – речовини, яка руйнує барвник і, таким чином, знебарвлює тканину на заданій ділянці. Резервне друкування полягає в тому, що на тканину перед гладким фарбуванням наносять речовину – резерв, що оберігає її на певних ділянках від забарвлення при фарбуванні.

Тканини друкують різними способами. При ручному способі друкування малюнок на тканині одержують за допомогою кліше – дерев'яної дошки з рельєфним узором. Проте, на даний час, цей спосіб застосовують лише для друкування хусток і скатертин. На відміну від ручної набивки, сучасні печатні машини мають циліндрові мідні вали з поглибленим малюнком. Зазвичай роботі перед нанесенням відбитку на тканину передує ряд підготовчих операцій, серед яких найважливіше значення має очищення, вирівнювання перекосів утоку і основи та розгладження тканини на каландрах.

Очищення текстильного матеріалу проводиться з метою попередження утворення дефектів в процесі друкування. З поверхні тканини видаляють пил, що з'явився в процесі оброблення, волокна, нитки, вузлики і пух. Вирівнювання перекосів утоку і основи має особливо важливе значення для тканин, на поверхню яких будуть наноситися набивні малюнки правильної геометричної форми. В протилежному випадку після заключного оброблення тканини, нанесенні на неї малюнки можуть бути значно спотворені. Для вирівнювання перекосу утоку і основи тканин використовують сушильно-ширильні машини. Для відновлення нормальної ширини тканину на ширильних рамах розтягують в напрямі утоку. Цей процес є дуже важливим для швейного виробництва, оскільки від його правильної поведінки в значній мірі залежить рівномірність тканини за шириною. Процес каландрування забезпечує пропрасовування тканин за допомогою особливих валів – металевих або з пресованого паперу. Якщо тканина йде лицьовим боком до металевих валів, вона виходить більш блискучою – лощеної, лицьовим боком до паперових – більш матовою.

Печатні машини бувають одновальні – для друкування на тканині одноколірних малюнків і багатовальні (до 16 валів) – для отримання багатоколірних малюнків (число кольорів в малюнку завжди відповідає числу друкувальних валів машини, оскільки кожний вал друкує лише одним кольором певну частину малюнка).

Під час друкування аерографічним способом на матеріал накладають картонний шаблон з вирізами у вигляді певного малюнка. За допомогою пульверизатора через вирізи в шаблоні на тканину наносять барвник. Міняючи положення пульверизатора і час оброблення, одержують забарвлення будь-якої інтенсивності. Аерографним способом друкування можна створювати малюнки з плавними переходами від одного тону до іншого.

При способі фотодруку основним робочим інструментом є шаблон. При вибиванні на тканину накладають шаблон і за допомогою гумової пластини (рамки) протирають фарбу. Для отримання багатоколірних малюнків вимагається застосовувати стільки шаблонів, скільки кольорів в малюнку. Цей спосіб друкування досить трудомісткий і малопродуктивний, проте він дозволяє відтворювати складні малюнки з фотографічною точністю.

Термодрукування включає два основні процеси: друкування малюнка на папері і перенесення малюнка з паперу на тканину. Для перенесення фарби з паперу на тканину використовують ефект сублімації: барвник при певній температурі (150–220 ºС) переходить з твердого стану безпосередньо в газоподібний, проникаючи глибоко в структуру матеріалу і закріплюючись там. При цьому спочатку відбувається адсорбція молекул барвника на поверхні, а потім дифузія їх всередину волокон і взаємодія з активними центрами волокон.

Зображення надруковане на спеціальному папері сублімаційним принтером, переноситься на тканину за допомогою каландра або термопреса. Дана технологія сприяє створенню яскравого зображення, стійкого до механічних пошкоджень, впливу ультрафіолетових променів, з високою стійкістю до прання.

Сублімаційний друк буває трьох видів.

Непрямий – це найефективніший метод, адже зображення виходять більш барвистими. Ескіз переноситься на предмет за допомогою паперу – так званого «проміжного шару».

Прямий мокрий – на предмет наносять шар поліестерної ґрунтовки, а малюнок наносять струменевим принтером.

Прямий сухий – виріб не обробляють, а відразу кладуть на лазерний принтер.

Технологія кожної методики підходить під певний вид матеріалу. Другий і третій способи використовують для фарбування одягу, до складу якого входить більший відсоток натуральних ниток.

Сублімаційний друк не підходить для фарбування шовку, бавовни та інших натуральних тканин, а також для синтетичних матеріалів малої щільності. У термопресі такі полотна розплавляться або згорять, адже температура досить висока – 160–230 ºС. До того ж під силою тиску може пошкодитися структура текстильного матеріалу. Технологія сублімації передбачає використання виробів з поліестеру або ж ацетатного волокна, тоді принт виходить неймовірно яскравим, стійким до хімічного впливу і ультрафіолету. Можна друкувати на змішаних тканинах, якщо синтетичного волокна буде не менше 50%, а в ідеалі – 70%.

Для дослідження було обрано 11 варіантів текстильних матеріалів, на які наносився малюнок за допомогою сублімаційного друку. Процес нанесення малюнка сублімаційного друку на синтетичні тканини досить простий, тому він настільки популярний. Обрану нами ілюстрацію перенесли на спеціальний папір за допомогою принта. Фарба на друкованому аркуші повинна повністю висохнути. Як тільки це відбулося, трафарет поклали на полотно лицьовою стороною, щоб пігмент стикався з тканиною. Отриману заготівлю помістили під термопрес і запекли. Далі акуратно дістали матеріал, швидко прибрали фотопапір, остудили і просушили.

Що відбувається з тканиною і фарбами в термопресі? Після того, як рідкі фарби потраплять на папір, вони поступово тверднуть. Під дією високих температур пігмент відразу переходить в газоподібний стан, минаючи рідку фазу. Під тиском «пофарбована» пара проходить в глибокі шари розігрітих волокон поліефіру, де й залишається. Після охолодження нитки полотна знову твердіють, і барвник виявляється всередині матерії. Таким чином, малюнок «зливається» з тканиною в одне ціле, не змінюючи структуру і характеристики полотна.

Досліджувані зразки отримані полотняним, візерунковим переплетеннями та рогожкою (рис. 1).

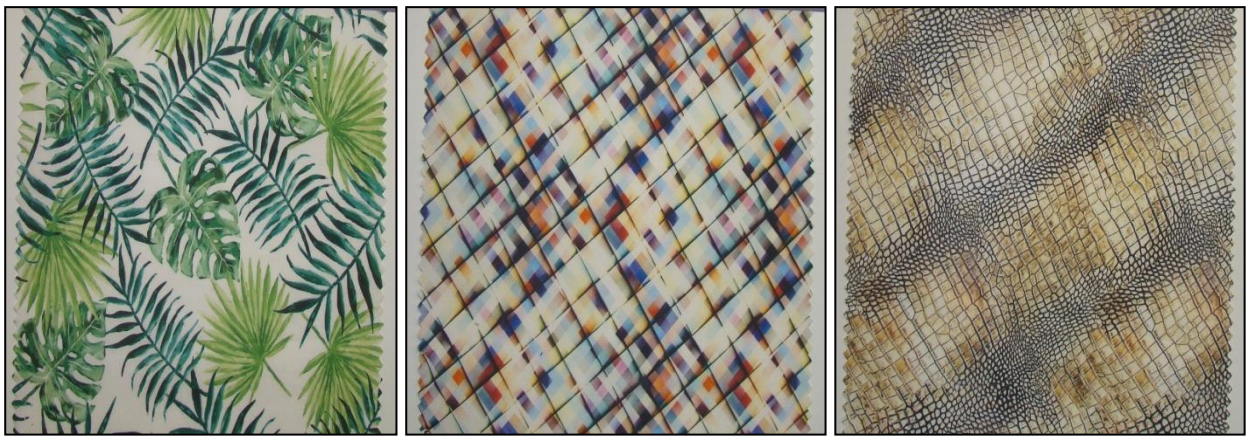


Рис. 1. Досліджувані текстильні матеріали з ефектом сублімації

Таблиця 1

Параметри будови досліджуваних текстильних матеріалів та їх ступінь тривкості пофарбування

Вар. зразка	Вид і лінійна густина пряжі (нитки), склад сировини/текс	Переплетення	Поверхнева густина, г/м^2	Товщина, мм	Ступінь тривкості пофарбування, бал		
					до тертя		до прання
1	*2*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
1	100% ПЕ	Візерункове	139	0,44	1-2	1	5/5
2	50% ПЕ 50% Бавовна	Полотняне	114	0,30	4	2-3	4/5
3	85% ПЕ 15% Бавовна	Рогожка	227	0,58	3-4	2	4/5
4	45% ПЕ 55% Бавовна	Полотняне	107	0,28	2-3	1	3/5
5	50% ПЕ 50% Бавовна	Полотняне	119	0,31	3	2-3	5/5
6	100% ПЕ	Полотняне	186	0,43	3	4	5/5
7	100% ПЕ	Полотняне	186	0,42	3	4	5/5
8	100% ПЕ	Рогожка	313	0,93	2-3	2	5/5
9	100% ПЕ	Рогожка	317	0,97	лицьова сторона 4 виворіт 1-2	лицьова сторона 3-4 виворіт 1	лицьова сторона 5/5 -
10	100% ПЕ	Рогожка	317	0,96	лицьова сторона 4 виворіт 3-4	лицьова сторона 4 виворіт 2-3	- виворіт 4/5
11	60% ПЕ 40% Бавовна	Полотняне	223	0,55	3	3	5/5

У складі текстильних матеріалів вар. 1, вар. 6–10 знаходяться волокна поліестеру, а у вар. 2–5 та вар. 11 – волокна поліестеру та бавовни. Сублімаційний друк нанесений на досліджувані текстильні матеріали у вар. 6 зображенням до барабану; у вар. 7 – зображенням до фетру; у вар. 8 нанесено на виворіт покриття; у вар. 9 – двосторонній друк за один прохід одночасно, лицьовою стороною до барабану, виворотом до фетру; у вар. 10 – двосторонній друк за один прохід одночасно, лицьовою стороною до фетру виворотом до барабана. Досліджувані зразки відрізняються поверхневою щільністю від 107 г/м^2 до 317 г/м^2, товщиною 0,28-0,97 мм.

Результати дослідження текстильних матеріалів представлені у табл. 1. Аналіз отриманих даних табл. 1 свідчить, що показник ступінь тривкості пофарбування до мокрого тертя, зменшується через присутність на досліджуваних текстильних матеріалах препаратів, які використовують при заключному оздобленні: вар. 1, вар. 3 та вар. 4 – полівінілацетат і становить 1–3 бала; вар. 2 та вар. 11 – силіконового пом'якшувача і становить 2-3 бали; вар. 5 – крохмальної шліхти і становить 2-3 бали; вар. 8 – поліакрилат (виворітна сторона) та вар. 10 (виворітна сторона) і становить 1–3 бали. У випадку необроблених досліджуваних зразків тканин вар. 6, вар. 7 та вар. 9 (лицьова сторона), 10 (лицьова сторона) показник ступеня тривкості збільшується і становить 3-4 бали.

Виявлено, що визначальний вплив на ступінь тривкості пофарбування має поверхнева густина та товщина тканини. Досліджено, що зі збільшенням щільності ниток, товщини та поверхневої густини у текстильних матеріалах підвищується ступінь тривкості пофарбування. Так, серед досліджуваних текстильних матеріалів найбільший ступінь тривкості пофарбування знаходиться у вар. 9 та вар. 10 і становить 3-4 бали при найбільшій поверхневій густині та товщині (поверхнева густина – 317 г/м^2, товщина – 0,96 мм та 0,97 мм відповідно). Найменший ступінь тривкості пофарбування знаходиться у вар. 4, що становить 1 бал, при найнижчій поверхневій густині та товщині і становить 107 г/м^2 та 0,28 мм.

Висновки

Аналіз сучасних тенденцій розвитку текстильної промисловості визначив необхідність створення і впровадження нових ефективних технологій виробництва з різних видів сировини текстильних матеріалів та процесу їх колорування. Вони мають бути здатними забезпечити максимальну якість й точність відтворення рисунка, володіти високими показниками фізико-механічних властивостей для тривалої експлуатації та високим степенем тривкості пофарбування.

Досліджено, що показник ступеня тривкості пофарбування до мокрого тертя зменшується через присутність на досліджуваних текстильних матеріалах препаратів, які використовують під час заключного оздоблення. Виявлено, що визначальний вплив на ступінь тривкості пофарбування має поверхнева густина та товщина тканини. Встановлено, що зі збільшенням щільності ниток, товщини та поверхневої густини у текстильних матеріалах підвищується ступінь тривкості пофарбування.

Основними напрямками вдосконалення оздоблення текстильних матеріалів слід вважати застосування технології сублімації, при цьому спочатку відбувається адсорбція молекул барвника на поверхні текстильного матеріалу, а потім дифузія їх всередину волокон і взаємодія з активними центрами волокон.

Література

1. Яковець І.О. До питання про класифікацію способів нанесення рисунків на текстильні матеріали / І.О. Яковець // Вісник ХДАДМ. – 2008. – № 12. – С. 156–162.

2. Гущак О.М. Оцінка впливу прання, хімічного чищення та прасування пофарбованих рослинними барвниками платтяних тканин на стійкість їх пофарбувань / О.М. Гущак, Б.Д. Семак // Вісник Львівського інституту економіки і туризму. Серія Товарознавча. – Львів : ЛІЕТ, 2016. – № 11. – С. 108–117.

3. Гущак О.М. Комплексна оцінка стійкості пофарбувань рослинними барвниками на вовняних, шовкових та капронових тканинах / О.М. Гущак, Б.Д. Семак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 2. – С. 250–257.

4. Дудла І.О. Дослідження властивостей пальтових вовняних тканиніз спеціальною обробкою після проведення волого-теплового оброблення / І.О. Дудла, О.Б. Хлебтань // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 4. – С. 25–34.

References

1. Yakovets I.O. On the question of classification of ways of drawing drawings on textile materials. Bulletin of the KCDAD, No. 12, 2008. P. 156–162.

2. Gushchak O.M., Semak B.D. Estimation of the influence of washing, dry-cleaning and ironing of plant dyes of tannins dyed on the stability of their dyes. Bulletin of the Lviv Institute of Economics and Tourism. Commodity Series. Lviv: LIET, 2016. № 11. P. 108–117.

3. Gushchak O.M., Semak B.D. Comprehensive assessment of the stability of dyes by vegetable dyes on wool, silk and kapron fabrics. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Khmelnitsky: KhNU, 2016. № 2. P. 250–257.

4. Doodle I.O. OB Khlebtan Investigation of the properties of coat woollen fabric by special treatment after wet-heat treatment. Bulletin of Chernihiv State Technological University. Chernihiv: ChSTU, 2012. № 4. P. 25–34.

Рецензія/Peer review : 17.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Семак Б.Д.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-53-57
УДК 621.3

О.В. ПАХОЛЮК
Луцький національний технічний університет
Г.О. ПУШКАР, І.С. ГАЛИК, Б.Д. СЕМАК
Львівський торговельно-економічний університет

ТОВАРОЗНАВЧІ ТА МАРКЕТИНГОВІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО РИНКУ НАНОТЕКСТИЛЮ І ОДЯГУ

Потреба створення в Україні окремого сегменту товарного ринку нанотекстилю і одягу, як свідчить аналіз літературних даних [1–8], обумовлена низкою причин. Назвемо основні з них: суттєве розширення асортименту та зростання обсягів виробництва нанотекстилю та наноодягу різного цільового призначення (особливо побутового, медичного та спеціального); потреба обґрунтування економічної доцільності створення сучасного асортименту нанотекстилю і наноодягу різного цільового призначення в Україні; потреба суттєвого поглиблення товарознавчих і маркетингових досліджень з метою створення наукових засад для формування окремого сегменту ринку нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на даному ринку в Україні; потреба вивчення та узагальнення зарубіжного досвіду створення та функціонування аналогічних ринків. Розглядаючи товарознавчі аспекти формування окремого сегменту вітчизняного ринку нанотекстилю і наноодягу, на нашу думку, першочергова увага повинна бути приділена вирішенню наступних завдань: вивченню можливості синтезу тих обробних нанопрепаратів, які здатні надавати, наприклад, одяговим текстильним матеріалам одночасно декілька необхідних ефектів (захищати їх від шкідливої дії волокноруйнуючих і патогенних мікроорганізмів, надавати їм необхідну атмосферо- та термостійкість, водоопірність та вогнетривкість, брудовідштовхувальність тощо); виробництво таких багатофункціональних наноматеріалів одягового призначення повинно бути економічно вигідним, а самі матеріали високогігієнічними та екологічно безпечними; за рівнем художньо-естетичного оформлення ці наноматеріали не повинні поступатися традиційним матеріалам і відповідати вимогам сучасної моди.

Ключові слова: *товарний ринок, нанотекстиль і одяг, товарознавчі аспекти, маркетингові дослідження, тестування нанотекстилю і наноодягу як нового товару на ринку, нанотехнології, виробництво нанотекстилю.*

E.V. PAKHOLIUK
Lutsk National Technical University
G.O. PUSHKAR, I.S. GALYK, B.D. SEMAK
Lviv Trade and Economical University

SOCIAL AND MARKETING ASPECTS OF FORMATION NATIONAL MARKET OF NANOTEXTILE AND CLOTHING

The need to create a separate segment of the market for nanotextiles and clothing in Ukraine, as evidenced by the analysis of literature data [1–8], is due to a number of reasons. Let's name the main ones: a significant expansion of the range and growth of production of nanotextiles and nano-clothes for various purposes (especially household, medical and special); the need to substantiate the economic feasibility of creating a modern range of nanotextiles and nano-clothes for different purposes in Ukraine; the need to substantially deepen commodity and marketing research in order to create scientific foundations for the formation of a separate segment of the market of nanotextiles and nano-apparel as new products in this market in Ukraine; the need to study and synthesize foreign experience in creating and operating similar markets. Considering the commodity aspects of the formation of a separate segment of the domestic market of nanotextiles and nanowear, in our opinion, the priority should be given to the following tasks: to study the possibility of synthesis of those processing nanopreparations that can give, for example, clothing textile materials several necessary effects (protect them from the harmful effects of fibrous and pathogenic microorganisms, give them the necessary atmospheric and heat resistance, water resistance, water resistance; the production of such multifunctional clothing nanomaterials should be economically viable and the materials themselves highly hygienic and environmentally safe; in terms of aesthetic design, these nanomaterials should not be inferior to traditional materials and meet the requirements of modern fashion.

Keywords: commodity market, nanotextiles and clothing, commodity aspects, marketing research, testing of nanotextiles and nanowear as a new product on the market, nanotechnology, production of nanotextiles.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Суть даної проблеми полягає в тому, щоб в процесі товарознавчих і маркетингових досліджень властивостей нанотекстилю та наноодягу різного цільового призначення необхідно виявити та оцінити ті їх властивості, які дозволяють об’єктивно оцінити рівень якості цієї нанопродукції та тестувати її як новий товар на сучасному товарному ринку України. Необхідність вирішення цього різнопланового завдання товарознавчими і маркетинговими службами у сферах легкої промисловості та торгівлі України обумовлена низкою причин, а саме:

– постійним зростанням обсягів виробництва та розширення асортименту нанотекстилю та наноодягу в останні десятиріччя та постійним зростанням попиту на ці товари;

– обмеженістю товарознавчих і маркетингових комплексних досліджень, присвячених обґрунтуванню структури асортименту та розвитку сучасного вітчизняного ринку нанотекстилю та наноодягу різного цільового призначення;

– потребою розроблення та стандартизації більш досконалих методик тестування нанопродукції як нового товару на сучасних ринках, включаючи нанотекстиль і наноодяг на товарному ринку України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даній роботі ми обмежимося аналізом тільки тих публікацій, які безпосередньо пов’язані з формуванням асортименту і властивостей нанотекстилю і наноодягу [1–8].

Авторами роботи [1] наведені дані, які стосуються характеристики частки випуску окремих видів нанопродукції у світі за 2016 рік. Вони відзначають, що частка текстильної продукції на світовому ринку у 2016 році становила 12%. При цьому виробництво нанотекстилю і наноодягу характеризується найбільш високими темпами.

Авторами роботи [2] описані основи нанотехнологій виробництва нановолокон, нанониток, наноматеріалів текстильного призначення та наноодягу останнього покоління. Дана характеристика сучасного асортименту і властивостей названих видів нанопродукції, обґрунтовані сфери їх застосування. Описані терміни і визначення, що стосуються нановолокон, текстилю і одягу XXI століття. Окремо розглянуто асортимент і властивості нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення.

В роботі [3] надано обґрунтування доцільності більш широкого використання нанотекстилю одягового призначення. Дана характеристика асортименту та властивостей даної групи нанотекстилю та обґрунтовані сфери його використання. Описані також ризики, пов'язані із виробництвом та застосуванням нанотекстилю.

Автором роботи [4] вивчена та обґрунтована доцільність створення в Україні нового сегменту товарного ринку реалізації медичного нанотекстилю, як нового товару на даному ринку. Обґрунтовані основні параметри функціонування даного ринку. Обґрунтована доцільність організації в нашій країні серійного виробництва найбільш перспективних видів медичного нанотекстилю.

В роботі [5] авторами проведено аналіз сучасного асортименту і властивостей нанотекстилю різного цільового призначення, який виробляється зарубіжними та вітчизняними підприємствами в останні роки. Наведена класифікація цього асортименту та обґрунтовані основні напрямки його розвитку в перспективі. Обґрунтовані сфери раціонального використання нанотекстилю різного цільового призначення.

Авторами роботи [6] на основі аналізу літературних джерел вивчені та обґрунтовані основні напрямки розвитку асортименту нанотекстилю в Україні та світі в останні роки. При цьому основну увагу приділено нанотекстилю і наноодягу побутового, медичного та спеціального призначення. Розкрито роль товарознавчих досліджень у формуванні сучасного товарознавчого ринку нанотекстилю та наноодягу.

Авторами роботи [7] обґрунтована доцільність більш широкого використання NBIC-технологій для виробництва нанотекстилю захисного призначення. При цьому основна увага приділена виробництву та використанню нанопрепаратів для захисту текстильних матеріалів і виробів від мікробіологічного та атмосферного руйнування.

Авторами роботи [8] вивчена та обґрунтована доцільність широкого застосування нанотекстилю одягового призначення для створення перспективного асортименту екотекстилю і одягу різного цільового призначення. При цьому доцільно особливу увагу приділити вирішенню наступних питань у галузі текстильного матеріалознавства та товарознавства:

– розкрити роль нанотехнологій у формуванні асортименту і властивостей текстильної наносировини, наноматеріалів і виробів одягового, медичного та спеціального призначення;

– більш широкого використання нанотехнологій для художньо-колористичного оформлення текстилю і одягу;

– використання нанотехнологій для вдосконалення заключного оброблення текстильних матеріалів і виробів одягового призначення.

Формулювання цілей статті

Мета роботи – формування основних положень методики тестування нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на сучасному товарному ринку України та обґрунтування доцільності їх стандартизації.

Розглядаючи нанотекстиль і наноодяг як нові товари на сучасному товарному ринку України, першочергову увагу слід приділити обґрунтуванню рівня новизни цих товарів, а саме:

– вивчення і обґрунтування можливостей легкої промисловості України випускати сучасний асортимент нанотекстилю та наноодягу різного цільового призначення;

– забезпечення відповідності державної підтримки розвитку окремого сегменту товарного ринку нанотекстилю та наноодягу в Україні.

Що стосується маркетингових аспектів даної проблеми, то їх слід націлити на вирішення наступних ключових завдань:

– вивчення і узагальнення потреб потенційних споживачів на конкретні види нанотекстилю і наноодягу різного цільового призначення;

– обґрунтування економічної, технологічної та екологічної доцільності виробництва і збуту конкретних видів нанотекстилю і наноодягу на підприємствах вітчизняної текстильної, трикотажної та швейної промисловості, а також обсягів їх імпорту;

– вивчення особливостей структури асортименту, властивостей, рівня якості та безпечності нанотекстилю і наноодягу імпортного виробництва, які нині домінують на ринку України;

– вивчення і узагальнення досвіду роботи зарубіжних ринків із аналогічною структурою асортименту;

– обґрунтування доцільності створення нових видів вітчизняних стандартів, в яких були би описані вимоги до системи класифікації, структури видового та внутрішньовидового асортименту та маркування нанотекстилю та наноодягу різного цільового призначення;

– впровадження обов'язкової державної статистичної звітності про обсяги виробництва та реалізації конкретних видів нанотекстилю і наноодягу різного цільового призначення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Аналізуючи літературні дані та узагальнюючи результати власних досліджень, присвячених обґрунтуванню доцільності створення в Україні окремого сегменту товарного ринку нанотекстилю і наноодягу, в даній роботі ми обмежилися вирішенням наступних завдань:

– обґрунтування вимог сучасного ринку до асортименту та властивостей нанотекстилю і наноодягу різного цільового призначення як нових товарів на даному ринку;

– формування оптимальності структури видового асортименту нанотекстилю (табл. 1) і наноодягу (табл. 2) на цьому сегменті вітчизняного ринку;

– обґрунтування переліку основних положень методики тестування нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на сучасному товарному ринку України та їх стандартизація.

При цьому основною вимогою до асортименту і властивостей нанотекстилю і наноодягу, на наш погляд, повинні бути не тільки рівень їх новизни, оригінальності та унікальності властивостей, але й високий і стабільний попит на ці товари зі сторони споживачів даного ринку. Більше того, ці вимоги повинні постійно підвищуватися та вдосконалюватися і обов'язково враховувати реальний попит споживачів даного ринку.

Таблиця 1

Перелік перспективних видів нанотекстилю на товарному ринку України

№ з/п	Назва виду нанотекстилю та його призначення
1	Штучні нановолокна для потреб текстильної та трикотажної промисловості
2	Синтетичні нановолокна для потреб текстильної та трикотажної промисловості
3	Штучні нанонитки для потреб текстильної та трикотажної промисловості
4	Синтетичні нанонитки для потреб текстильної та трикотажної промисловості
5	Нанопрепарати для водовідштовхувальної та брудовідштовхувальної обробки текстильних матеріалів
6	Нанопрепарати для незминальної та малоусадкової обробки целюлозовмісних текстильних матеріалів
7	Нанопрепарати для антимікробної обробки текстильних матеріалів
8	Нанопрепарати для термостійкої обробки текстильних матеріалів
9	Нанопрепарати для атмосферостійкої обробки текстильних матеріалів
10	Інтерактивний «розумний» нанотекстиль різного цільового призначення
11	Медичний нанотекстиль різного цільового призначення
12	Нанотекстиль з гідрофобізованими покриттями
13	Нанобарвники текстильного призначення
14	Нанотекстиль військового призначення

Примітка. В табл. 1 наведені найбільш поширені види нанотекстилю різного цільового призначення

В табл. 1 і 2 наведено основні і перспективні види нанотекстилю і наноодягу. Обсяги їх реалізації на вітчизняному ринку текстилю постійно змінюється залежно від зміни попиту на них і зміни кон'юнктури даного ринку.

Таблиця 2

Перелік перспективних видів наноодягу на товарному ринку України

№ з/п	Назва наноодягу різного цільового призначення
1	Наноодяг різних способів виробництва та призначення
2	Наноодяг спортивного призначення
3	Наноодяг військового призначення
4	Наноодяг медичного призначення
5	Екологобезпечний і елітний наноодяг різного цільового призначення

А тепер розглянемо більш детально потребу створення методики тестування нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на сучасному товарному ринку України.

На нашу думку, необхідність вирішення цього завдання диктується наступними причинами:

– постійним ростом обсягів виробництва та розширенням асортименту нанотекстилю і наноодягу в Україні в останні десятиріччя;

– потребою створення окремого сегменту вітчизняного ринку нанотекстилю і одягу, як це прийнято в багатьох економічно розвинутих країнах;

– обмеженістю товарознавчих і маркетингових досліджень, пов'язаних з вдосконаленням методики тестування рівня новизни нових видів товарів, які поступають на вітчизняний ринок в останні роки.

Для вирішення цього завдання ми скористалися результатами досліджень окремих авторів, опублікованих в останні роки у вітчизняних літературних джерелах [9–12, 14] із аналогічної проблематики.

Авторами роботи [9] розкрито сутність і зміст маркетингового аудиту, пов'язаного із обґрунтуванням методики оцінки рівня якості та безпечності нових видів товарів, які нині поступають на сучасний ринок текстилю в Україні. Цей підхід може бути використано і для вдосконалення методики тестування нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на сучасному ринку. При цьому першочергову увагу,

на думку авторів [9], слід приділити оцінюванню рівня новизни та конкурентоспроможності відзначених видів нанопродукції.

Авторами роботи [10] сформульована та обґрунтована концепція житлового циклу нового товару, згідно з якою розробка та впровадження на ринок товару включає такі етапи:

– пошук ідеї про новий товар;
– відбір ідей;
– економічний аналіз концепцій нового товару;
– розробка нового товару та перевірка його якості;
– випробовування нового товару в умовах ринку;
– впровадження нового товару на ринок.

При цьому автори виділяють кілька типів нових товарів:

– світові новинки – принципово новий товар, якого нема на даному ринку;
– варіант вдосконаленого товару, який користується підвищеним попитом на ринку;
– модифікований товар, який користується підвищеним попитом на ринку.

Авторами роботи [11] запропоновано структурно-логічну модель оцінювання конкурентоспроможності товарів різного цільового призначення. Вони відзначають, що конкурентоспроможність продукції є багатоаспектною категорією, яка характеризує відповідність продукції за всіма параметрами (технічними, естетичними, інформаційними, інноваційними) вимогам ринку. Дана характеристика процесів проведення оцінки конкурентоспроможності товару на ринку.

Авторами роботи [12] надано визначення сутності питання «новий товар промислового підприємства». Сформульовані та обґрунтовані основні підходи до визначення рівня новизни цього товару. Дана характеристика цих підходів.

Окрім цього, дано аналіз літературних джерел, присвячених оцінці новизни різних за призначенням товарів на сучасному товарному ринку України.

В роботі [13] автором вивчено і узагальнено особливості формування та оцінювання конкурентоспроможності товарів вітчизняної легкої промисловості. Обґрунтовані основні критерії оцінки конкурентоспроможності цих товарів. Запропоновано оригінальну методику оцінки конкурентоспроможності на основі виявлення і встановлення конкурентних переваг нових видів товарів, які поступають на ринок. На основі аналізу літературних джерел автором [13] визначені основні критерії конкурентоспроможності товарів (табл. 3).

Таблиця 3

Основні критерії конкурентоспроможності товарів [13]

Критерій	Основні критерії конкурентоспроможності товарів
	Сутнісна характеристика
Рівень якості товару та його стабільність	Якість як головна характеристика товару – це здатність товару виконувати свої функції. Рівень якості – відносна характеристика, заснована на порівнянні показників якості продукції й аналога конкурента
Соціальна адресність	Соціальна адресність – відповідність характеристик продукції специфічним потребам соціальних груп споживачів (пов'язані з демографічними і поведінковими ознаками)
Споживча новизна товару	Новий товар – це предмет споживання, який задовольняє нові потреби людини або, порівняно з товаром-попередником, більш повно задовольняє потреби, що склалися
Інформативність товару	Інформативність продукції – здатність виражати свою суспільну цінність через інформацію про конкурентні переваги
Ціна споживання товару	Ціна як грошовий вираз вартості товару, служить для непрямої зміни величини витраченого на виробництво товару суспільно необхідного робочого часу
Достовірність	Свідчення достовірності – це спеціальне і захисне маркування товарів, сертифікати відповідності тощо
Безпека	Безпека продукції – це безпека для життя, здоров'я, майна споживача і навколишнього середовища за звичних умов використання, зберігання, транспортування і утилізації
Імідж товару	Імідж організації (підприємства) – популярність і репутація як надійного партнера, здатного забезпечити якість товарів, в строк виконати свої зобов'язання

Висновки

Аналіз літературних джерел і результатів власних досліджень дозволяє оцінити можливість та обґрунтувати доцільність створення в Україні окремого сегменту ринку нанотекстилю і наноодягу в рамках загального товарного ринку, як це прийнято у багатьох економічно розвинутих країнах світу.

Встановлено, що для тестування нанотекстилю і наноодягу як нових товарів на сучасному ринку, доцільно більш широко використовувати показники їх конкурентоспроможності, які є комплексними критеріями оцінки технічних, гігієнічних, екологічних, естетичних, економічних та інших характеристик цих товарів (особливо це стосується оцінки новизни нанотекстилю одягового, медичного та спеціального призначення).

Обґрунтована доцільність поглиблення товарознавчих і маркетингових досліджень оптимальності асортименту, властивостей, а також рівня якості та безпечності нанотекстилю і наноодягу з метою інформаційного забезпечення розвитку та функціонування названого сегменту їх ринку.

Література

1. Фесенко О. М. Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі / О. М. Фесенко, С. В. Ковальчук, Р. А. Нищик // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2017. – № 1. – С. 170–179.

2. Кричевский Г. Е. Нано-, био-, химические технологии и производство нового поколения волокон, текстиля и одежды / Г. Е. Кричевский. – М. : Изд-во «Известия», 2011. – 528 с.

3. Шлапак О. С. Нанотехнології у текстильній промисловості / О. С. Шлапак // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2011. – № 3. – С. 107–112.

4. Семак Б. Б. Проблеми формування ринку медичного нанотекстилю в Україні / Б. Б. Семак // Економіка та держава. – 2015. – № 3. – С. 15–18.

5. Матвейцова Д. С. Нанотехнології у виробництві текстильних матеріалів / Д. С. Матвейцова, А. С. Карван, О. А. Параска // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 55–60.

6. Галик І. С. Сучасні напрямки формування асортименту нанотекстилю / І. С. Галик, Б. Д. Семак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 73–76.

7. Галик І. С. Використання NBIC-технологій для виробництва захисного текстилю та одягу / І. С. Галик, Б. Д. Семак // Вісник Львівської комерційної академії. – 2015. – Вип. 15. – С. 11–16.

8. 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.

9. Корягіна С. В. Маркетинговий аудит : навчальний посібник / С. В. Корягіна, М. В. Корягін. – К. : Центр навч. л-ри, 2014. – 320 с.

10. Маркетинг : навчальний посібник / С. І. Чеботар, Я. С. Ларіна, О. П. Луцій, М. Г. Шевчик та ін. – Київ : Наш час, 2007. – 504 с.

11. Серединська В.М. Конкурентоспроможність продукції: значення та сфера застосування / В. М. Серединська, О. М. Загородна // Інфраструктура ринку. – 2017. – № 4. – С. 93–98.

12. Кубишина Н. С. Оцінка ідей нового товару на промисловому підприємстві / Н. С. Кубишина, Т. В. Ковальчук // Економічний вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» : збірник наукових праць. – К. : КМО, 2015. – № 12. – С. 355–361.

13. Заріцька Н. М. Оцінка конкурентоспроможності продукції підприємства / Н. М. Заріцька // Ефективна економіка. – Київ. – 2015. – № 12. – С. 8–12.

14. Pakholiuk E.V. Research of the firmness of painting by the linen clothes fabrics to action the repeated washing / Pakholiuk, B.D. Semak, O.I. Peredriy, G.I. Golodyuk // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. – 2015. – № 3 (357). – P. 78–81.

References

1. Fesenko O. M. Problemy ta perspektyvy rozvytku nanotekhnolohii v Ukraini ta sviti / O. M. Fesenko, S. V. Kovalchuk, R. A. Nyshchyk // Marketynh i menedzhment innovatsii. – 2017. – № 1. – S. 170–179.

2. Krichevskij G. E. Nano-, bio-, himicheskie tehnologii i proizvodstvo novogo pokoleniya volokon, tekstilya i odezhdy / G. E. Krichevskij. – M. : Izd-vo «Izvestiya», 2011. – 528 s.

3. Shlapak O. S. Nanotekhnolohii u tekstylnii promyslovosti / O. S. Shlapak // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2011. – № 3. – S. 107–112.

4. Semak B. B. Problemy formuvannia rynku medychnoho nanotekstyliu v Ukraini / B. B. Semak // Ekonomika ta derzhava. – 2015. – № 3. – S. 15–18.

5. Matveitsova D. S. Nanotekhnolohii u vyrobnytstvi tekstylnykh materialiv / D. S. Matveitsova, A. S. Karvan, O. A. Paraska // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2014. – № 5. – S. 55–60.

6. Halyk I. S. Suchasni napriamky formuvannia asortymentu nanotekstyliu / I. S. Halyk, B. D. Semak // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 3. – S. 73–76.

7. Halyk I. S. Vykorystannia NBIC-tekhnolohii dlia vyrobnytstva zakhysnoho tekstyliu ta odiahu / I. S. Halyk, B. D. Semak // Visnyk Lvivskoi komertsiinoi akademii. Seriia tovaroznavcha. – 2015. – Vyp. 15. – S. 11–16.

8. Halyk I. S. Problemy formuvannia ta otsiniuvannia ekolohichnoi bezpechnosti tekstyliu : monohrafiia / I. S. Halyk, B. D. Semak. – Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi komertsiinoi akademii, 2014. – 488 s.

9. Koriahina S. V. Marketynhovyi audyt : navchalnyi posibnyk / S. V. Koriahina, M. V. Koriahin. – K. : Tsentr navch. l-ry, 2014. – 320 s.

10. Marketynh : navchalnyi posibnyk / S. I. Chebotar, Ya. S. Larina, O. P. Lutsii, M. H. Shevchyk ta in. – Kyiv : Nash chas, 2007. – 504 c.

11. Seredynska V.M. Konkurentospromozhnist produktsii: znachennia ta sfera zastosuvannia / V. M. Seredynska, O. M. Zahorodna // Infrastruktura rynku. – 2017. – № 4. – S. 93–98.

12. Kubyshyna N. S. Otsinka idei novoho tovaru na promyslovomu pidpryiemstvi / N. S. Kubyshyna, T. V. Kovalchuk // Ekonomichnyi visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut» : zbirnyk naukovykh prats. – K. : KMO, 2015. – № 12. – S. 355–361.

13. Zaritska N. M. Otsinka konkurentospromozhnosti produktsii pidpryiemstva / N. M. Zaritska // Efektyvna ekonomika. – Kyiv. – 2015. – № 12. – S. 8–12.

14. Pakholiuk E.V. Research of the firmness of painting by the linen clothes fabrics to action the repeated washing / Pakholiuk, B.D. Semak, O.I. Peredriy, G.I. Golodyuk // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. – 2015. – № 3 (357). – P. 78–81.

Рецензія/Peer review : 8.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Байдакова Л.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-58-63
УДК 7.012:687.016:677.077.5

А.Ю. СТАНКО, О.М. ЛУЩЕВСЬКА
Хмельницький національний університет

ДИЗАЙН-ПРОЕКТУВАННЯ АВТОРСЬКОГО АНСАМБЛЮ ОДЯГУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНТУ «ЕФЕКТ ДЕГРАДЕ»

Проведено аналіз колекцій відомих дизайнерів та визначено, що найбільш актуальним видом оздоблення одягу є принти. Розроблено узагальнену класифікацію різновидів сучасних принтів та сформовано модні тенденції принта для оздоблення жіночого одягу. На основі спроектованого за джерелом творчості авторського принта із «ефектом деграде» виконано дизайн-проект та виконано апробацію готового святкового ансамблю жіночого одягу.

Ключові слова: авторський ансамбль, оздоблення одягу, принт, ефект деграде, сучасні тенденції.

O.M. LUSHCHEVSKA, A.Y. STANKO
Khmelnytskyi National University

DESIGN-DEVELOPMENT OF THE AUTHOR'S ENSEMBLE CLOTHING WITH USING «DEGRADE EFFECT» PRINT

The purpose of the work is design-development and production author's ensemble of women's clothes using print created by the source of creativity, which match of fashion trends. To achieve this goal, an information-analytical method of researching current types of decoration, system-structural analysis of modern prints, as well as a method of morphological analysis of the source of creativity with its subsequent synthesis based on the data obtained. Collections of modern designers are analyses, it was and determined that the most relevant type of garment finishing is print. Prints are used in 42%...47% of considered models of modern clothes. Based on the analysis of the frequency of occurrence of the print in the collections of clothes by years, peaks of the popularity of such decoration were identified and a forecast was made regarding its relevance for the next two years. A generalized classification of varieties of modern prints for the decoration of women's clothing has been developed. On the basis of collections of designers of famous fashion houses for the period 2010–2019 were sorted the varieties of modern prints and highlighted the most promising ones. They are geometric, floral, abstraction, with oil painting and print «degrade effect». The latter, as the most promising one, was chosen to decorate the author's ensemble of women's clothing. Recommendations are given on the design of the print «degrade effect» and the method of its application to fabric, which can be used by manufacturers for decoration of clothing in the conditions of mass production.

Keyword: author's ensemble, garment finishing, print, «degrade effect», fashion trends.

Вступ

Високий рівень конкуренції на ринку модної індустрії, розширення обсягів масового виробництва та стрімкий темп розвитку інформаційних технологій зобов'язує сучасного дизайнера знаходити нові та ефективні методи проектування та оздоблення одягу. Саме застосування сучасних технологій оздоблення дозволяє швидко та ефективно урізноманітнити асортимент швейних виробів. Таким чином актуальним є пошук оригінальних джерел творчості та їх інтерпретацій у формі та силуеті одягу, матеріалі, кольорових рішеннях, що дозволить створити ексклюзивний образ споживача, який підкреслить його індивідуальність. На світових подіумах у колекціях сучасних дизайнерів часто використовують традиційні, давно відомі види оздоблень, а саме ручну вишивку, мережку, аплікацію, петчворк, а також нові, нетрадиційні, пов'язані з властивостями конкретних матеріалів або появою новітніх технологій виготовлення оздоблення. Одним із таких видів сучасних оздоблень є принт, що може наноситись на тканину різними методами. Сучасні текстильні матеріали зі значним вмістом синтетичних волокон дозволяють використовувати різні інноваційні способи оздоблення, такі як сублімаційний друк, складні види перфорації, машинну вишивку та інші.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Протягом останніх років основним трендом в фешн-індустрії є активне використання світовими дизайнерами принтів у одязі та аксесуарах. Сучасний принт в одязі повинен розроблятися відповідно до модних і стильових уподобань людини, з урахуванням її пропорцій, розмірної та вікової групи. Авторами роботи [1] систематизовано інформацію щодо орнаментальних принтів у сучасному одязі до тематичних зображень, встановлено найбільш вагомі і споживчі вимоги до принтів, серед яких перше місце належить естетичним вимогам. Ряд робіт [2–5] відображають актуальність оздоблення одягу власноруч розробленим і виконаним принтом у різних техніках, зокрема художнім розписом [3], у техніці батік та петчворк [4, 5]. Ручні види нанесення принтів дозволяють підвищити художньо-композиційну виразність одягу, надавши йому оригінальності та ексклюзивності, однак їх виконання потребує значних витрат часу та ресурсів, тому ручні види принтів практично не використовують у масовому виробництві одягу.

У статті [6] проведено дослідження актуальності поєднання художньо-композиційних характеристик українського національного костюму та технології сублімаційного друку на тканині для створення сучасної колекції молодіжного жіночого одягу. Не зважаючи на значну кількість досліджень та розробок різних принтів відсутня інформація щодо систематизації існуючих видів принтів та їх класифікації, а також інформація щодо найбільш актуальних принтів 2019–2020 рр.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є дизайн-проектування авторського ансамблю святкового жіночого одягу із використанням розробленого за джерелом творчості принта, що відповідає сучасним напрямкам моди. Для

досягнення поставленої мети необхідно дослідити та проаналізувати сучасні тенденції оздоблення одягу в світовій індустрії моди; розробити рекомендації щодо створення принта з «ефектом деграде» для оздоблення жіночого одягу та виконати апробацію розробленого авторського ансамблю.

Виклад основного матеріалу

Мода не стоїть на місці, вона постійно стрімко змінюється та розвивається, кожного дня виникають нові види оздоблення, матеріали, технології. Тому, з метою розроблення авторського ансамблю жіночого одягу святкового призначення необхідним є дослідити, які оздоблення найчастіше сьогодні використовуються у колекціях відомих дизайнерів. Для цього проведено аналіз моделей жіночого одягу, використовуючи фото із показів таких будинків моди, як Alexis Mabille, Chanel, Christian Dior, Elie Saab, Givenchy, Valentino, D&G, Just Cavalli. Важливим було дізнатися: на яких ділянках найчастіше розташовують оздоблення, які види оздоблення застосовують та які матеріали необхідні для їх виготовлення? Для дослідження обрано два часові періоди: з 2010 року до 2014 р. та з 2015 року до 2019 р. (табл. 1).

За результатами дослідження встановлено, що найчастіше оздоблення розташовують по всій довжині виробу (45 %), також досить часто оздоблення розташоване по низу (22 %) та у верхній частині виробу (20 %). Рідше оздоблення розташоване по рукаву (8 %) та по горловині виробу (5 %).

Таблиця 1

Результати дослідження зустрічності видів оздоблення жіночого одягу

Вид оздоблення	Частота зустрічності, %	
	2010–2014 рр.	2015–2019 рр.
Принт	42	47
Вишивка	32	23
Аплікація	18	17
Перфорація	5	5
Нашивки	5	7
Петчворк	-	1

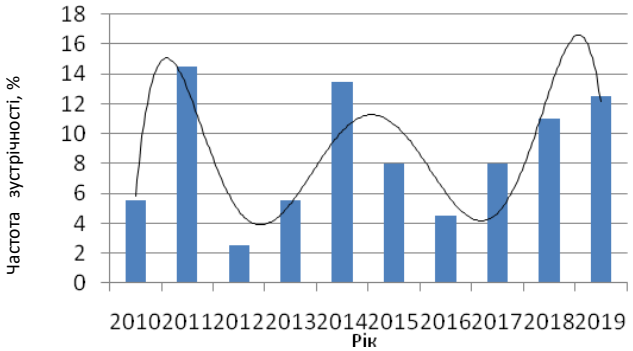


Рис. 1. Частота зустрічності оздоблення жіночого одягу принтом за роками

У результаті проведеного аналізу встановлено, що найчастіше для оздоблення жіночого одягу як у 2010–2014 рр. та і в 2015–2019 рр. використовувались принти (42 % та 47 % відповідно), вишивка (32 % та 23 % відповідно) та аплікація (18 % та 17 % відповідно). Як видно із таблиці 1 використання принтів для оздоблення одягу з часом збільшилося (на 5 %), у той час як використання вишивки зменшилося (на 9 %). Для оздоблення одягу, згідно з результатами проведеного дослідження, рідше використовують перфорацію тканини (по 5 % у двох часових періодах) та нашивки (5 % у 2010–2014 рр. та 7 % у 2015–2018 рр.). Також в деяких моделях 2015–2019 рр. зустрічається такий вид аплікації, як петчворк (1 %) – шиття з клаптиків тканини [7].

Аналіз частоти зустрічності принта в оздобленні жіночого одягу за роками представлено у вигляді гістограми (рис. 1) та лінії тренду, що являє собою синусоїду. Варто відмітити, що отримана крива характеризується збільшувальним періодом коливання, так найбільша популярність принта спостерігалась у 2011 р. та 2014 р., а із 2016 р. частота його застосування впевнено збільшується.

Зважаючи на те, що частота зустрічності принтів у модному одязі 2019 р. за величиною ще не досягла піків 2011 р. та 2014 р. (14,5 % та 13,5 %), можна припустити, що популярність принта як оздоблення буде зростати ще один–два роки, після чого знову піде на спад. Тобто, підсумовуючи вище викладене, можна стверджувати, що принт є одним із найпопулярніших видів оздоблення сучасного жіночого одягу і його популярність продовжує зростати.

На основі аналізу малюнків тканин, що використані у моделях модних будинків за період 2010–2019 рр. було створено класифікацію принтів, які найчастіше зустрічаються у оздобленні жіночого одягу (рис. 1).

Розроблена класифікація принтів містить шість класів за характером зображення принтів, а саме геометричні, флористичні, анімалістичні, етнічні, абстрактні, предметні. Більш давнім видом візерунків на тканині є геометричні: вони походять від космогонічних уявлень людей про світ і від технологічних способів виготовлення предметів. Це такі відомі мотиви орнаментів, як клітинка, смужка, ромб, горошок та ін. Флористичні принти відображають стилізовані листя аканта, дуба, лавра, винограду, квіткові мотиви, овочі, фрукти. Різноманіття світу флори – чудове джерело творчості для дизайнерів, ці принти завжди на піку популярності. Періодично в моду входять принти на тканинах, які імітують візерунки шкур різних представників фауни, так звані анімалістичні принти. Етнічні мотиви відображають національні орнаменти народів світу.

Абстрактні принти розробляються на основі абстрактного живопису, що здійснює вплив на органи чуття людини за рахунок емоційного сприйняття ліній, плям і кольорів. Предметні принти набувають все більшої популярності і відображають зображення різних предметів: різних видів взуття, музичних інструментів, напоїв та різноманітних гастрономічних страв (рис. 2).

Рис. 2. Класифікація сучасних принтів

Рис. 3. Різновиди актуальних принтів 2019–2020 рр.

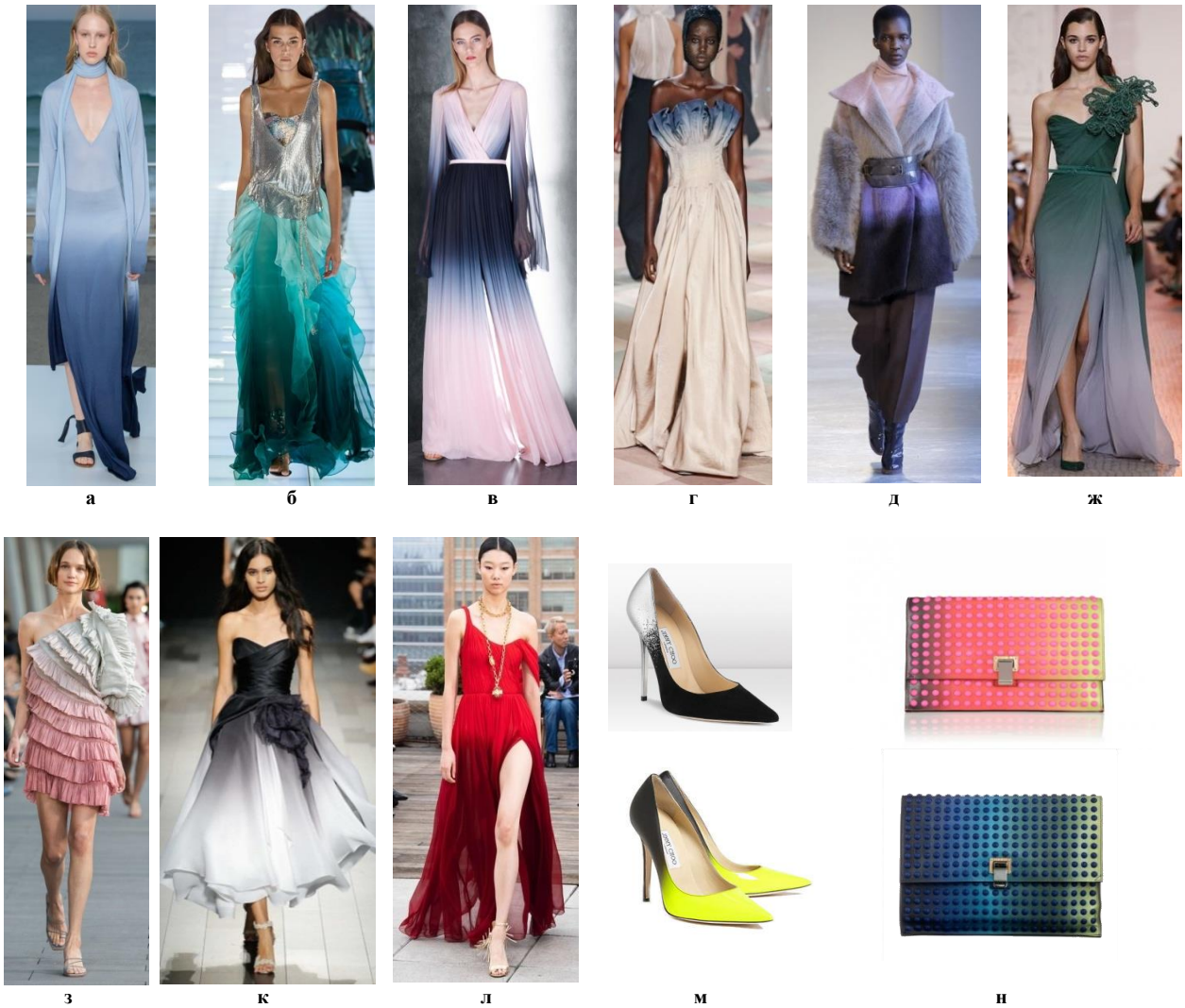


Рис. 4. Сучасний асортимент виробів з використанням "ефекту деграде": а – Jonathan Simkhai (Australia Resort 2020); б – Pamella Roland, 2018; в – Azzaro (Fall 2019 Couture); г – Aje (Australia Resort 2020); д – Agnona, 2018–2019; ж – Christian Dior (Spring 2019); з – Elie Saab (Autumn-Winter 2018–2019); к – Oscar de la Renta (Spring-Summer 2019); л – Marchesa (Spring 2018); м – туфлі Jimmy Choo; н – клатч Proenza Schouler

Аналіз моделей колекцій 2019–2020 рр. відомих дизайнерів та будинків моди дозволив виявити різновиди найбільш актуальних принтів, представлених на рис. 3.

Як видно з рис. 3, актуальними принтами є флористичні, геометричні принти, живопис, абстракція та «ефект деграде». Найчастіше в моделях колекцій даного періоду зустрічається «ефект деграде», саме тому його доцільно використати для розроблення сучасного жіночого одягу.

Деграде – це техніка декоративного фарбування, що являє собою плавний перехід від темного відтінку до більш світлого. Існує як однотонне «розтягування», де змінюється тільки відтінок, так і багатобарвне. Головна особливість техніки – м'яка, плавна зміна відтінків.

Вперше ефект деграде з'явився у Вікторіанську епоху в Європі, найчастіше він виконував декоративну функцію. Наприклад, для прикраси стрічок, вбрання, ковдр і навіть меблів. Потім особливо популярним ефект деграде був у 1970-х і 1990-х роках. Цей принт вважався модним атрибутом серед бунтарів, маргіналів, панків, хіппі і всіх, хто любив епатувати громадськість. Темно-світлі футболки та сукні виглядали так само зухвало, як порвані і виварені джинси [8].

Провівши аналіз сучасних тенденцій моди, використовуючи фото з показів різних будинків мод, було встановлено, що тренд на «ефект деграде» актуальний та займає лідируючі місця у всіх сферах індустрії краси: макіяж губ в стилі омбре, фарбування волосся, манікюр, і настільки популярний ефект не міг не надихнути модельєрів і дизайнерів під час створення своїх нових колекцій (рис. 4).

а б

Рис. 5. Ескізний проект ансамблю жіночого святкового одягу під девізом «Каттлея»: а – джерело творчості, б – ескіз ансамблю

Пальму першості впевнено тримає марка Jonathan Simkhai (рис. 4, а), креативний дизайнер якої тільки за пару останніх сезонів не раз встиг прикрасити свої наряди «ефектом деграде». Ставку на жіночність зробили і в Pamella Roland – на сукнях можна розглянути різні відтінки кольорів з різною розтяжністю градієнту (рис. 4, б). Французький бренд Azzaro використав «ефект деграде» у своїх сукнях, а саме надавши ефектності плавному переходу, використавши легкі шифонові полотна (рис. 4, в). У сукнях від Aje «ефект деграде» досягнуто за рахунок градієнту та нашарувань тканини (рис. 4, г). Ближче до осені дизайнери додають плавні переходи і на більш теплих речах. У шубі від бренду Agnona колір змінюється від темно-фіолетового до бузкового та на комірі від світло-сірого до ніжно-рожевого кольору (рис. 4. д).

Такі відомі модні будинки, як Christian Dior, Elie Saab, Oscar de la Renta, Marchesa та багато інших, часто застосовують «ефект деграде» в повсякденному та святковому одязі (рис. 4, ж, з, к, л), взутті і аксесуарах (рис. 4, м, н). Аксесуари також не вбереглись від деграде – туфлі Jimmy Choo (рис. 4, м) мають як переходи від неонових фарб до чорного, так і використання блискучих фактур. Кращою сумкою з ефектом деграде став клатч Proenza Schouler – серед натовпу його виділяють не тільки сміливі колірні зміни, але і пластиковий декор. Враховуючи вище викладене, для оздоблення авторського ансамблю обрано саме принт «ефект деграде».

Джерело творчості є основоположним і визначальним аспектом у формуванні стильових образно-емоційних і конструктивних характеристик у авторському ансамблі одягу. Враховуючи результати проведеного дослідження при дизайн-проектуванні ансамблю з використанням «ефекту деграде» джерелом натхнення обрано орхідею сорту каттлея, яка представляє собою неповторної форми квітку, із різьбленими бархатистими краями пелюсток, що мають забарвлення із плавним переходом одного кольору в інший (рис. 5).

До даного ансамблю входять штани, розширені по низу; асиметрична блузка-топ з рукавом крильце, знімна баска та головний убір у вигляді капелюшка-квітки. Відповідно до джерела творчості для оздоблення авторського ансамблю пропонується принт «ефект деграде», який розміщується по низу штанів, низу блузки-топ, низу рукава-крильце, низу баски, аналогічно тому як розміщується забарвлення по низу пелюсток квітів орхідей.

Наступним етапом є фарбування матеріалу в техніці деграде. Залежно від структури тканини використовуються різні методи нанесення принту на одяг [8–10]: трансферний друк, трафаретний трансфер, ручний розпис, сублімаційний друк, шовкографія. В процесі пошуку найбільш раціональної технології фарбування тканини обрано технологію сублімаційного друку. В основі цієї технології – спеціальні барвники, які під дією температури і тиску проникають глибоко в структуру тканини. Для сублімаційного нанесення застосовують спеціальні сублімаційні фарби, здатні до переходу в газоподібний стан. За допомогою принтера цими фарбами друкується зображення на відповідному сублімаційному папері, що

покритий тонким шаром спеціального лаку. Основною перевагою методу сублімації є можливість наносити на тканину зображення будь-якої складності, включаючи фотографії. Серед недоліків важливо відмітити, що нанесення сублімаційних фарб можливе тільки на синтетичні тканини, тому що дані фарби можуть закріпитися тільки на поліефірних волокнах [10].

Враховуючи технологію та особливості сублімаційного друку, матеріалом для виготовлення авторського ансамблю обрано габардин ніжно-молочного кольору. Для виконання «ефекту деграде» в програмі GIMP2 розроблено 3 варіанти градієнту, які відрізняються між собою кольоровим вирішенням та величиною розтяжки. Для цього застосовано інструмент «градієнтна заливка». У відповідності до джерела творчості обрано параметри кольору для утворення зразків градієнту, які наведено в таблиці 2 та параметри інструменту «градієнтна заливка», які наведено в таблиці 3.

Таблиця 2

Параметри кольору для утворення градієнту

Параметри кольору	Баланс кольору для виготовлення зразків градієнту			
	Зразок 1		**Зразок 2**	**Зразок 3**
	H	302	359	315
	S	93	93	73
	V	12	21	40
	R	30	54	103
	G	2	4	28
	B	29	5	84
HTML розмітка		1c021d	360405	671c54

Таблиця 3

Параметри інструменту «градієнтна заливка»

Панель інструменту		**Зразок 1**	**Зразок 2**	**Зразок 3**
Режим		Звичайний		
Непрозорість		100		
Градієнт		Основний в фоновий (HSV тон проти годинникової стрілки)		
Форма		Лінійна		
Повтор		-	-	-
Зміщення		0	0	0
Розмиття		+	+	+
Тону-вання	Тон	190	185	180
	Насиченість	60	55	50
	Освітлення	0	0	0
Постеризація		3	3	3

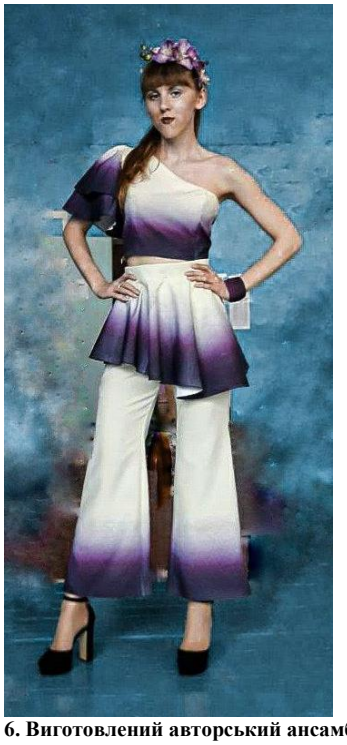


Рис. 6. Виготовлений авторський ансамбль під девізом «Каттлея»

Розроблені три зразки градієнтів віддруковані на принтері Epson PX-1004 сублімаційними фарбами та перенесені на тканину габардин за допомогою промислового пресу для дублювання DISON DS-38. Температура нагрівання поверхні становила 200°С, час дублювання – 1 хв.

Для того, щоб визначити: який зі створених зразків «ефекту деграде» найкраще відповідає художньому задуму та ескізу авторського ансамблю, – проведено експертне опитування за допомогою створеної анкети [11]. За результатами оцінювання зразків встановлено, що зразок № 3 має високий рівень відповідності ескізу ансамблю (йому надали перевагу (40 % опитаних)); зразок № 2 відповідає ескізу у достатньому рівні (33 % опитаних); зразок № 1 на думку експертів не відповідає ескізу.

Результатом дизайнерської розробки є спроектований і виготовлений авторський святковий ансамбль жіночого одягу під девізом «Каттлея» з використанням розробленого принта «ефект деграде» (рис. 6). Даний авторський ансамбль приймав участь у Всеукраїнському фестивалі молодих дизайнерів «Барви Поділля – 2019», де отримав схвальні відгуки глядачів та членів журі.

Висновок

На основі аналізу колекцій відомих Будинків моди виявлено, що для оздоблення жіночого одягу, у 47 % моделей, дизайнери використовують різноманітні принти. На основі аналізу частоти зустрічності принта у колекціях одягу за роками виявлено піки популярності такого оздоблення і сформовано прогноз щодо його актуальності на найближчі два роки. Встановлено, що найбільш популярними для 2018–2019 рр. є принти із флористичними, геометричними малюнками, із зображенням живопису, абстракції та із «ефектом деграде». Саме останній, як найбільш перспективний, обрано для оздоблення авторського ансамблю жіночого святкового одягу. Наведено рекомендації щодо дизайн-проектування принта «ефект деграде», створеного за джерелом творчості, та спосіб його нанесення на тканину, що може бути використано виробниками для оздоблення одягу в умовах масового виробництва. Перспективами подальших досліджень є надання обґрунтованих рекомендацій щодо вибору тканин з певними властивостями для оздоблення принтом одягу різного асортименту та призначення.

Література

1. Цимбал О. М. Інформаційна структуризація авторських орнаментальних принтів та їх роль у сучасному дизайні одягу / О. М. Цимбал, С. М. Березненко // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (1-2 листопада 2018 р.). – Київ : КНУТД, 2018. – С. 114–118.

2. Остапенко Н. В. Дизайн-розробка коллекції жіночого одягу з використанням авторських принтів / Н. В. Остапенко, С. В. Верба, Т. В. Луцкер [та ін.] // Art & Design. – 2018. – № 1. – С. 114–125.

3. Луцкер Т. В. Художньо-композиційні характеристики моделей колекції жіночого одягу в стилі мілітарі / Т. В. Луцкер, М. С. Винничук, О. В. Колосніченко [та ін.] // Art & Design. – 2019. – № 1. – С. 117–126.

4. Жидких О. Б. Формотворчий аспект у створенні одягу з використанням технік декорування батік та печворк / О. Б. Жидких, О. Л. Тригуб // Art & Design. – 2018. – № 2. – С. 27–33.

5. Abraham E. A. Sirigu Symbols: A Metaphoric Element for Batik Prints / E. A. Abraham, O. Vincentia // Journal of Arts and Design Studies. – 2013. – № 12. – P. 49–57.

6. Колосніченко О. В. Застосування принципів гармонізації елементів українського національного костюма в процесі проектування сучасного одягу / О. В. Колосніченко, М. В. Норець., І. В. Фролов, І. Л. Гайова // Art & Design. – 2018. – № 1. – С. 75–81.

7. Лущевська О. М. Дослідження сучасних видів оздоблення з метою створення авторської колекції жіночого одягу / О. М. Лущевська, А. Ю. Станко // Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної інтернет-конфренції молодих вчених та студентів (15-16 листопада 2018 р.). – Хмельницький : ХНУ, 2018. – С. 129-130.

8. Patent no. US008529984B2. United States. Method of producing an ombre / Sally Sirkin Lewis; 2013, Sep. 10.

9. Patent no. US2016/0069004. A1 United States. Fabric with level gradient effect / Yi-Yung CHEN; 2016, Mar. 10.

10. Seema H.S. A Comparative Study on Discharge Printing Using Conventional and Ecological Recipe / H.S. Seema, L. Deepik, Babu Ambika // Journal of Trends in Textile Engineering & Fashion Technology. – 2018. – № 3. – P. 245–261.

11. Лущевська О. М. Особливості розроблення авторського ансамблю з ефектом деграде / О. М. Лущевська, А. Ю. Станко // Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної інтернет-конфренції молодих вчених та студентів (10-11 жовтня 2019 р.). – Хмельницький : ХНУ, 2019. – С. 47–49.

References

1. Tsymbal O. M. Informatsiina strukturyzatsiia avtorskykh ornamentalnykh pryntiv ta yikh rol u suchasnomu dyzaini odiahu / O. M. Tsymbal, S. M. Bereznenko // Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (1-2 lystopada 2018 r.). – Kyiv : KNUTD, 2018. – S. 114–118.

2. Ostapenko N. V. Dyzain-rozrobka kollektsii zhinochoho odiahu z vykorystanniam avtorskykh pryntiv / N. V. Ostapenko, S. V. Verba, T. V. Lutsker [ta in.] // Art & Design. – 2018. – № 1. – S. 114–125.

3. Lutsker T. V. Khudozhno-kompozytsiini kharakterystyky modelei kolektsii zhinochoho odiahu v styli militari / T. V. Lutsker, M. S. Vynnychuk, O. V. Kolosnichenko [ta in.] // Art & Design. – 2019. – № 1. – S. 117–126.

4. Zhydkykh O. B. Formotvorchyi aspekt u stvorenni odiahu z vykorystanniam tekhnik dekoruvannia batik ta pechvork / O. B. Zhydkykh, O. L. Tryhub // Art & Design. – 2018. – № 2. – S. 27–33.

5. Abraham E. A. Sirigu Symbols: A Metaphoric Element for Batik Prints / E. A. Abraham, O. Vincentia // Journal of Arts and Design Studies. – 2013. – № 12. – R. 49–57.

6. Kolosnichenko O. V. Zastosuvannia pryntsypiv harmonizatsii elementiv ukrainskoho natsionalnoho kostiuma v protsesi proektuvannia suchasnoho odiahu / O. V. Kolosnichenko, M. V. Norets., I. V. Frolov, I. L. Haiova // Art & Design. – 2018. – № 1. – S. 75–81.

7. Lushchevska O. M. Doslidzhennia suchasnykh vydiv ozdoblennia z metoiu stvorennia avtorskoi kolektsii zhinochoho odiahu / O. M. Lushchevska, A. Yu. Stanko // Resursozberihaiuchi tekhnolohii lehkoi, tekstylnoi i kharchovoi promyslovosti : zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konfrentsii molodykh vchenykh ta studentiv (15-16 lystopada 2018 r.). – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – S. 129-130.

8. Patent no. US008529984B2. United States. Method of producing an ombre / Sally Sirkin Lewis; 2013, Sep. 10.

9. Patent no. US2016/0069004. A1 United States. Fabric with level gradient effect / Yi-Yung CHEN; 2016, Mar. 10.

10. Seema H.S. A Comparative Study on Discharge Printing Using Conventional and Ecological Recipe / H.S. Seema, L. Deepik, Babu Ambika // Journal of Trends in Textile Engineering & Fashion Technology. – 2018. – № 3. – R. 245–261.

11. Lushchevska O. M. Osoblyvosti rozroblennia avtorskoho ansambliu z efektom dehrade / O. M. Lushchevska, A. Yu. Stanko // Resursozberihaiuchi tekhnolohii lehkoi, tekstylnoi i kharchovoi promyslovosti : zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konfrentsii molodykh vchenykh ta studentiv (10-11 zhovtnia 2019 r.). – Khmelnytskyi : KhNU, 2019. – S. 47–49.

Рецензія/Peer review : 3.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Захаркевич О. В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-64-69
УДК 685.34.341

А.І. БАБИЧ, В.О. МОВША, В.П. НЕМИРОВЕЦЬ, Г.К. ДЖИБУ
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШКІРЯНИХ МАТЕРІАЛІВ І ГОТОВОГО ЧОЛОВІЧОГО ПОВСЯКДЕННОГО ВЗУТТЯ З ПОКРАЩЕНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В статті досліджено зносостійкість і деформацію готових виробів, виготовлених з натуральної шкіри, призначених для виробництва верху взуття, а також фізико-механічні характеристики шкіряних матеріалів для виробництва виробів зі шкіри. Досліджено експериментальним шляхом процеси поетапного зношування лицевої поверхні матеріалу для виробництва виробів зі шкіри. Розроблено пакет конструкторсько-технологічної документації на вироби даної серії. Виготовлено зразки моделей чоловічого взуття з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Перевірено згідно з вимогами стандартів ДСТУ EN ISO 20344: 2009 і доведено експериментальним шляхом високу зносостійкість матеріалів і готових виробів, здатність матеріалу до багаторазового згину, розтягу, мокрого і сухого тертя. Удосконалені ергономічні властивості повсякденного взуття за рахунок використання матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями. Розроблені конструкції асортиментної серії повсякденного чоловічого взуття з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: *якість, зносостійкість, деформація, видовження, характеристика, гнучкість, фіксація, форма, шкіра, показник, виріб.*

A.I. BABICH, V.S. MOVSHA, V.P. NEMIROVETS, G.V. JIBU
Kyiv National University of Technology and Design

RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LEATHER MATERIALS AND READY MEN'S EVERYDAY SHOULDER WITH ADVANCED FUNCTIONAL-OPERATING CHARACTERISTICS

The article investigates the durability and deformation of finished products made of genuine leather, intended for the production of uppers, as well as the physical and mechanical characteristics of leather materials for the production of leather products. The processes of stepwise wear of the face surface of a material for the manufacture of leather products have been investigated experimentally. The package of design and technological documentation for the products of this series has been developed. Samples of models of men's shoes with high operational characteristics and the technology of its manufacture are made. Tested in accordance with the requirements of DSTU EN ISO 20344: 2009 and proved experimentally by the high durability of materials and finished products, the ability of the material to multiple bending, tensile, wet and dry friction. Improved ergonomic properties of everyday footwear through the use of materials with improved physical and mechanical properties. Designs of assortment series of everyday men's shoes with high performance characteristics and technology of its production are developed.

Keywords: *quality, durability, deformation, elongation, characteristic, flexibility, fixation, shape, skin, index, product.*

В умовах сьогодення актуальним питанням є удосконалення технологій з метою виробництва взуття, яке володіє покращеними функціонально-експлуатаційними характеристиками, використання сучасних інноваційних матеріалів і технологій виробництва. Тому в даній роботі мова буде йти про сучасні матеріали, фактори споживчого вибору, що впливають на формування спектру впровадження новацій у виробництво взуття, етапи удосконалення технологічних ланок процесів виробництва взуття і експериментальні випробування матеріалів і виробів з метою покращення функціонально-експлуатаційних характеристик виробу з використанням сучасних методів і засобів виробництва [1].

Виробництво взуття у всі часи було привабливим бізнесом, що має стійкий попит. Це традиційно з старих часів було заробітком майстрів-чоботарів, які вручну виробляли вироби без застосування обладнання. Великих коштів на той час такий бізнес не приносив, але дозволяв майстру і його родині не бідувати. Оскільки люди потребували послуг майстра у виробництві взуття, він мав розширювати свій бізнес, набирати на роботу помічників різної кваліфікації і навчати справі учнів. З часом у виробництві виробів зі шкіри стали використовуватись технічні засоби і обладнання, завдяки чому підвищувалась продуктивності праці, а з використанням різних технологічних новинок і витратних матеріалів урізноманітнились вироби, їх кількісний і якісний показники стрімко зросли. Відповідно ринок насичувався виробами.

Виробники взуття щорічно на професійних виставках демонструють хорошу динаміку, продовжують розвиватись і вдосконалювати якісні і кількісні показники виробів і своєї роботи.

Постановка завдання

Актуальним завданням підприємств, які спеціалізуються на виробництві взуття різними серіями, є дослідження конструкцій, технологій та сучасних матеріалів з метою удосконалення виробництва виробів в цілому, осучаснення конструкції взуття та вдосконалення або покращення показників якості та ефективності виконання робіт даної сегментної групи. Дані дослідження дають можливість дослідити, проаналізувати та сформувати спектр дій, які забезпечують необхідний рівень якості технологій і виробів [1–7].

Метою роботи є дослідження діючих на підприємстві технологій виробництва чоловічого взуття, показників якості та ефективності виконання робіт, які забезпечують необхідний рівень відповідності виробів до вимог стандартів [2]. Дослідження тенденцій моди і попиту на взуття в умовах сучасних торговельних центрів, виявлення потреб споживачів щодо придбання виробів, обґрунтування використання

споживчих потреб у формуванні розробки сучасного асортименту та конструкцій виробів, удосконалення технологічних процесів виробництва чоловічого взуття та дослідження і аналіз фізико-механічних властивостей сучасних матеріалів для верху взуття.

Основна частина

В результаті аналізу сучасних напрямків моди та думок споживачів, отриманих на основі проведеного анкетування за критеріями вагомості (рис. 1), за підтримки ТОВ «Calif», була розроблена асортиментна серія чоловічих черевиків для повсякденного носіння і виготовлено дослідні зразки моделі виробу (рис. 2), які піддавалися експериментальним випробуванням на фізико-механічні характеристики.

В процесі дослідження, а саме анкетування споживачів, виявлено, що ціна на вироби є переважаючим показником вагомості думок споживачів, який відсуває комфорт на третє місце у діаграмі вагомості, однак залишає його в трійці чемпіонів. Тому питаннями створення комфортного взуття виробнику необхідно займатися більш глибоко. Вивчати питання зі вдосконалення конструкції та її здешевлення, не втрачаючи показників якості і комфортності.

Залежно від матеріалу підкладки (шкіра підкладкова, хутро, текстиль) розроблену модель взуття можна експлуатувати в різні періоди календарного року при різних температурах від +10°С до –20 °С. Для виготовлення дослідних зразків використано у якості матеріалів верху натуральну шкіру «ULTRA» та хутряну підкладку. Низ взуття – формована підошва ТЕП з бортиком. Взуття виготовлялось клеєпрошивним методом кріплення низу на підприємстві «Calif» [3].

Перевірка властивостей матеріалів та взуття проводилась за такими показниками: визначення фізико-механічних показників матеріалів верху виробів; міцність ниткового кріплення деталей взуття; міцність кріплення деталей низу до верху взуття; стійкість підошви до стирання та багаторазового згинання.

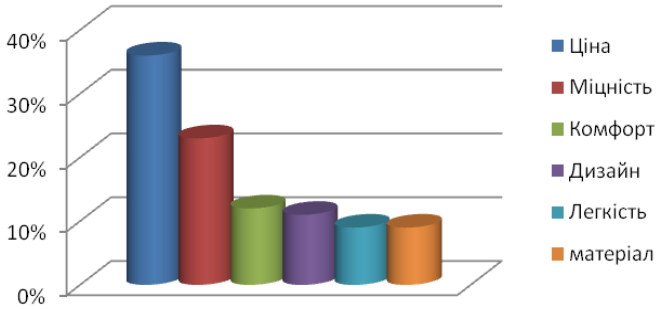


Рис. 1. Розподіл пріоритетів споживчих переваг при виборі чоловічого взуття

Рис. 2. Розроблений зразок черевиків чоловічих для повсякденного носіння

Для досліджень якості шкіри для верху взуття було відібрано 5 зразків натуральних шкір, виробництва Баришівського шкіряного заводу, під брендом «ULTRA» [8, 9].

Загальні органолептичні ознаки шкір для верху взуття представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Органолептичні ознаки шкір для верху взуття

Показник	Зразок шкіри				
	1	2	3	4	5
Назва	Флотар	Авалон	Денвер	Крейзі	Скай/ Райс
Артикул	350-Р15-5505	650-Р-154352	100-Р-110601	200-Р-151215	150-Р-15 1516
Колір	бордо	блакитний	білий	чорний	беж
Стан мережівки	Крупнозерниста мережівка з глибоким тисненням	Не глибокі хаотичні лінії	Природний стан мережівки	Не глибокі хаотичні лінії	Природний стан мережівки
Вид лицьової поверхні	нешліфована	шліфована	нешліфована	шліфована	нешліфована

Для оцінки якості шкір за фізико-механічними властивостями визначали межу міцності матеріалу при розтягуванні, відносне видовження при напружені 10 МПа, стійкість покриття до багаторазового вигину, адгезію покривної плівки до мокрої та сухої шкіри. Для оцінки якості шкір за хімічним складом визначали масову частку вологи, масову частку оксиду хрому та вміст речовин, що екстрагуються органічними розчинниками. Для оцінки якості шкір за фізичними характеристиками визначали товщину шкір, уявну питому вагу та температуру зварювання (рис. 3).

Отже, обрані для досліджень зразки були оцінені на якість за показниками хімічного складу, фізичних та фізико-механічних властивостей. Результати проведених досліджень представлені в табл. 2–4. Як видно з представлених даних вище зазначених таблиць, досліджувані зразки шкір за показниками фізичних, фізико-механічних властивостей та хімічним складом повністю задовольняють вимоги стандарту для шкір для верху взуття [10, 11].

Таблиця 2

Показники хімічного складу шкір

Зразок	Вміст, %				pH хлоркалієвої витяжки
	Волога	Мінеральні речовини*	РЕОР**, %	Cr2O3*	
1	12,2	11,5	6,5	4,2	4,1
2	13,4	11,8	6,7	4,4	4,5
3	14,2	11,6	7,3	4,3	4,4
4	13,4	11,5	6,7	4,6	4,5
5	11,9	12,1	6,8	4,8	4,4
Вимоги стандарту	10-16	-	3,7-10,0	≥ 3,5	4,0-7,5***

* в перерахунку на абсолютну суху речовину

**речовини, що екстрагуються органічними розчинниками

***ДСТУ 4239:2003 «Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги».

В результаті проведених досліджень щодо оцінки хімічного складу шкір для верху взуття (табл. 2) встановлено, що всі шкіри за рівнем вмісту вологи, оксиду хрому та вмісту речовин, що екстрагуються органічними розчинниками відповідають вимогам нормативного документу ДСТУ 2726-94 «Шкіра для верху взуття. Технічні вимоги». Відхилення за показником вмісту вологи для всіх досліджуваних зразків не перевищувало 16,0 %. Вміст речовин, що екстрагуються органічними розчинниками для всіх зразків знаходився в межах 6,5–7,3 %, що задовольняє вимоги зазначеного показника в межах 3,7–10,0 %. Аналіз хімічного складу досліджуваних шкір вказує, що для всіх шкір вміст оксиду хрому відповідає вимогам стандарту ДСТУ 2726-94 «Шкіра для верху взуття. Технічні умови» [10] і знаходиться на рівні 4,2–4,8 % в перерахунку на абсолютно суху речовину. Відхилення даного показника в межах досліджуваних зразків не перевищувало 10–12 %. Відповідно до гігієнічних вимог згідно ДСТУ 4239:2003 «Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги» [11], важливе значення має вміст оксиду хрому, як хімічного елементу. Аналіз показників вмісту мінеральних речовин та pH хлоркалієвої витяжки, які не нормуються нормативним документом ДСТУ 2716-94, виявив практично тотожні значення для всіх зразків в межах 11,5-12,0 %. Рівень pH хлоркалієвої витяжки всіх зразків становив 4,1-4,4 од. За ДСТУ 4239:2003 «Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги» цей показник повинен знаходитись в межах 4,0–7,5 і свідчить про гігієнічні властивості готових шкір та рівень їх безпечності.

Аналіз фізико-механічних властивостей шкір для верху взуття представлено в табл. 3. За результатами проведених досліджень (табл. 3) слід відмітити високу міцність натуральних шкір для верху взуття, про що свідчать дані межі міцності при розтягуванні зразків. В разі шкір з природною лицьовою поверхнею (зразок 1) характерним є більший рівень даного показника на 14 % вимог стандарту. Враховуючи те, що характерною особливістю зразків 2 і 4 є їх шліфована лицьова поверхня, дані зразки мають дещо нижчі показники межі міцності та видовження, однак за числовим значенням вони теж відповідають вимогам стандарту. За результатами показників відносного видовження, всі зразки відповідають вимогам нормативного документу, і значення видовження при навантаженні 9,8 МПа не є меншим 20 %.

Таблиця 3

Фізико-механічні випробувань шкір

Зразок	Межа міцності при розтягненні, ×9,8 МПа	Відносне видовження, %		Стійкість покривної плівки до багаторазового вигину, бали	Адгезія покривної плівки, Н/м: в сухому вигляді / в мокрому вигляді
		при навантаженні 9,8 МПа	при розриві		
1	1,7	54	80,0	4	341 / 147
2	1,56	50	62,	5	392 / 165
3	1,50	30	59,5	5	382 /154
4	1,52	42	60,0	4	374/148
5	1,50	41	61,5	5	381/161
Вимоги стандарту	1,50	20-40	-	>3	100/200 50/70

Щодо вимог до відносного видовження при розриві – вони не визначені нормативним документом. Хоча аналіз отриманих даних вказує, що зразок із нешліфованою лицьової поверхнею (зразок 1) є більш пластичними і еластичними. Інші зразки (3 та 5) мають нижчі значення відносного видовження при розриві. Це може бути обґрунтовано кількістю нанесеної покривної фарби. Адже зразок 3 згідно з технологічним циклом для досягнення однотонного рівномірного білого кольору піддається багатошаровому нанесенню покривної фарби із вмістом оксиду титану, що знижує пластичні властивості самої шкіри. Аналогічно колір зразка 5 теж передбачає використання пігментів-наповнювачів, які створюють непрозору покривну плівку і тим самим ущільнюють її, що впливає на пластичність шкіри в цілому. Особливу увагу слід звернути на рівень адгезії покривної плівки до сухої і мокрої шкіри. Для всіх шкір значення цього показниками в декілька разів перевищує вимоги стандарту, що свідчить про достатню міцність з'єднання покриття з поверхнею шкіри. При цьому показник стійкості покривної плівки до багаторазового вигину відповідає вимогам стандарту для всіх зразків шкіри і свідчить про високі експлуатаційні властивості готових шкір і взуття в цілому.

Аналіз фізичних властивостей шкір для верху взуття представлено в табл. 4. Незважаючи на те, що (окрім товщини) показники фізичних властивостей не нормуються вимогами стандарту для шкір для верху взуття, однак їх дослідження дає інформацію про рівень структурування та сформованості дерми шкіри.

Згідно з вимогами стандарту [10] за товщиною натуральні шкіри, що отримані зі шкур великої рогатої худоби, поділяють на тонкі (1,2–1,4 мм), середні (1,4–1,6 мм), товсті (1,6–2,2 мм). Досліджувані зразки мають різні товщини, що ділить їх на різні класи за товщиною. Так, зразки 2 та 5 є тонкими матеріалами, зразки 1 та 3 – матеріалами середньої товщини і зразок 4 належить до товстих матеріалів за товщиною. Всі шкіри, які мають товщину більше 1,6 мм, можуть використовуватись для виготовлення безпідкладкового взуття, до таких шкір можна віднести зразок 4. Всі інші зразки шкіри можуть бути використані для виготовлення підкладкового взуття. Особливо це стосується зразків шкір 2 та 5.

Показник питомої ваги шкіри свідчить про масу одиниці об'єму шкіри. Для взуття важливим є його легкість, що забезпечує комфортність носіння виробу людиною. Найнижчі рівні питомої ваги шкіри характерні для зразків 1 та 4 (відповідно 1,245 та 1,215 г/см^3), тоді як зразки 2, 3 та 5 мають питому вагу на 8-9 % вище. Це обумовлено вмістом пігментів-наповнювачів у складі покривної фарби та необхідності формування рівномірного світлого забарвлення поверхні шкіри, що досягається багатошаровістю покриття. В цілому, велика кількість шарів та склад покривної композиції обумовлює підвищення маси одиниці об'єму шкіри та зростання питомої ваги шкіри.

Таблиця 4

Фізичні властивості шкір

Зразок шкіри	Лінійні розміри зразка шкіри	Питома вага шкіри, г/см^3	Температура зварювання, ºС
	Товщина, мм		
1	1,4	1,245	105
2	1,2	1,314	104
3	1,6	1,324	104
4	1,7	1,215	106
5	1,3	1,341	105

Температура зварювання для всіх зразків шкіри є в межах 104-105 ºС, що свідчить про якісний рівень формування структури дерми шкіри та прогнозує її високу стійкість під час склеювання деталей заготовки взуття та довговічності чи зносостійкості взуття в цілому.

Отже, слід відмітити, що всі зразки натуральних шкір для верху взуття згідно з показниками хімічного складу, фізичних та фізико-механічних властивостей повністю відповідають вимогам нормативних документів і є безпечними для стопи людини. При цьому, для забезпечення необхідного мікроклімату в всередині взуття під час його експлуатації, доцільно використовувати натуральні шкіри з нешліфованою лицьовою поверхнею та мінімальним покривним оздобленням. Відповідно до цього принципу, доцільним є, в першу чергу, рекомендувати для виготовлення взуття шкіри «Флотар» бордового кольору (відповідно до досліджуваного зразка), з крупнозернистою мережівкою та глибоким тисненням, оздоблення яких не передбачало шліфування та не характеризувалось покривною плівкою світлого або білого кольору з багатошаровим нанесенням.

Другим етапом дослідження було проведено дослідження властивостей виробів на різні характеристики з метою перевірки і підтвердження якості виробів щодо заявлених вище характеристик виробу, а саме: міцність ниткового кріплення деталей взуття; міцність кріплення деталей низу до верху взуття; стійкість підошви до стирання та багаторазового згинання [10,11].

Для підвищення міцності кріплення деталей верху між собою та підвищення водостійкості ниткового шва застосовували нитки фірми «Coats», які значно спрощують технологічний процес складання деталей у заготовку, за рахунок виключення клеєнамащувальних операцій для герметизації швів.

Використання поліефірних ниток Gral AW фірми «Coats» з водовідштовхувальним обробкою дозволяють заздалегідь попереджати капілярну дію проникнення води в шов. Міцність ниткового кріплення визначали згідно з ГОСТ 9290-76. Результати випробувань відображені у табл. 5. Випробування на міцність кріплення деталей верху з пакетом деталей низу проводились за методикою, ДСТУ EN ISO 20344 «Методи випробовування взуття». Результати випробувань відображені у табл. 6.

Для визначення стійкості до стирання, були відібрані найпоширеніші види підошов, які використовуються при виготовленні повсякденного взуття клейового методу кріплення, це поліуретанова одношарова (ПУ, щільністю 0,5–0,6 кг/м^3), формована підошва з термоеластопласту (ТЕП) та двошарова підошва з поліуретану (ПУ/ПУ, нижній шар зносостійкий, щільністю 1-1,22 г/см^3, проміжний шар з ударопоглинальною щільністю 0,55-0,6 г/см^3).

Таблиця 5

Результати випробувань міцності ниткового кріплення деталей верху чоловічих черевиків для повсякденного носіння, Н/см

Назва показника	Значення показників за НТД, Н/см	Результати випробувань, Н/см
Міцності ниткового кріплення деталей верху союзка з берцями	не менше 160	Ліва напівпара 178/174 Права напівпара 170/175
Міцності ниткового кріплення деталей верху задинка з берцями	не менше 160	Ліва напівпара 178/176 Права напівпара 174/175

Таблиця 6

Результати випробувань міцності кріплення деталей верху та низу, Н/мм

Назва показника	Значення показників по НД	Результати випробувань
Міцність з'єднання підошва/верх	Не менше ніж 4,0	Ліва напівпара 7,1 Права напівпара 7,5

Таблиця 7

Результати випробувань стирання та багаторазового згину підошви черевиків чоловічих для повсякденного носіння з верхом із натуральної шкіри клеєпрошивного методу кріплення (підошви з двошарового поліуретану (ПУ/ПУ), підошви з термоеластопласту (ТЕП) та поліуретану одношарового (ПУ))

Назви показників	НД на метод випробувань	Значення показників до НТД	Результати випробувань		
			ПУ	ТЕП	ПУ/ПУ
Стійкість до стирання підошви	ISO 4649-2014 ДСТУ EN ISO20344	Не більше 0,17 гр, не більше 250 мм^3	0,12 гр (182 мм^3)	0,13 гр (168 мм^3)	0,03 гр (4,2 мм^3)
Стійкість до багаторазового згину підошви	ISO 4649-2014 ДСТУ EN ISO 20344 п.8.4.2	Не більше 4 мм	Є тріщини	Без розростання тріщин	Без розростання тріщин

Випробування на стійкість до багаторазового згину проводились згідно з методикою, ДСТУ EN ISO 20344 «Методи випробовування взуття». Стійкості до стирання визначали згідно з ISO 4649:2010, метод А (із вертикальною силою 10 Н на відстані стирання 40 мм). Результати випробувань відображені в табл. 7.

Висновки

На сьогодні виробництво виробів зі шкіри є актуальним, а виробництво натуральної шкіри як матеріалу є пріоритетним напрямом розвитку легкої промисловості України. Однак із-за нестабільної економічної і політичної ситуації в країні, з кожним роком обсяги її виробництва зменшуються. Це пов'язано з закриттям великої кількості вітчизняних переробних заводів, причиною яких є погіршення економічних умов для малого та середнього бізнесу. Більшість виробників перестають самостійно виготовляти товари, і займаються перепродажем з Китаю та Туреччини. Ще однією причиною є те, що населення не може дозволити собі якісний шкіряний виріб, тому росте попит на дешеві, менш якісні аналоги.

Натуральні шкіри мають широку сферу застосування. Більша частина вітчизняного виробництва направлена на виготовлення шкір для верху взуття. Тому контроль якості натуральних шкір є досить важливим фактором. Оскільки людина проводить тривалий час доби у взутті, важливо, щоб їй було зручно і комфортно. Враховуючи актуальність та доцільність мети даного дослідження, для оцінювання якості обрано зразки шкір виробництва Баришівського заводу. Зразки характеризувались єдністю сировини, з якої виготовлені натуральні шкіри для верху взуття, однак відмінності визначались у товщині, кольорі, стані лицьової поверхні та способі оздоблення лицьової поверхні.

Обрані для досліджень зразки були оцінені на якість за показниками хімічного складу, фізичних та фізико-механічних властивостей. В цілому, всі зразки натуральних шкір для верху взуття згідно з показниками перелічених раніше властивостей повністю відповідають вимогам нормативних документів і є безпечними для стопи людини. Для забезпечення необхідного мікроклімату у середині взуття під час його експлуатації, доцільно використовувати натуральні шкір із нешліфованою лицьовою поверхнею та мінімальним покривним оздобленням. Можна рекомендувати для виготовлення взуття шкіри Флотар, оздоблення яких не передбачає шліфування та не характеризується покривною плівкою кольору з багатошаровим нанесенням.

Для виготовлення взуття з покращеними експлуатаційними характеристиками необхідно використовувати натуральні шкіри бажано з гідрофобним покриттям, метод кріплення може бути різним, однак клеєпрошивний є привабливішим, так як він герметично і міцно з'єднує матеріал низу з верхом

взуття, а литтєвий метод, крім герметичного з'єднання заготовки з підошвою, спрощує технологічний процес та дозволяє отримувати в процесі виробництва взуття багатошарові і багатокольорові підошви. Двошарові підошви з нижнім шаром з зносостійкого матеріалу мають переваги відносно одношарових підошов з поліуретану та підошов ТЕП, що мають більшу стійкі до стирання, багаторазового згину, легкі, гнучкі. Однак всі досліджувані види підошов за вказаними у НТД показниками є відповідними і можуть бути використані для виготовлення взуття, як окремі формовані деталі, при клейовому та клеєпрошивному методі кріплення.

Література

1. Головко М.П. Товарознавство одягово-взуттєвих товарів : навч. посібник / М.П. Головко [та ін.]. ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х., 2015. – 459 с.
2. Данилкович А.Г. Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів : монографія / А. Г. Данилкович, І. М. Грищенко, В. І. Ліщук [та ін.]. – К. : Фенікс, 2012. – 344 с.
3. Деякі питання переробки товарів за межами митної території України та внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України : постанова Кабінету Міністрів України № 461 від 21.05.2018 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/879-2013-%D0%BF
4. Ізовіт Т. Тенденції розвитку українського ринку виробництва шкіри / Т. Ізовіт, І. Науменко // Легка промисловість. – 2015. – № 4. – С. 2–4.
5. Офіційний сайт Державної служби статистики України / Статистична інформація [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ukrstat.gov.ua.
6. Байдакова Л.І. Товарознавство. Непродовольчі товари: взуттєві і хутряні вироби / Людмила Іванівна Байдакова. – К. : Вища школа, 2007. – 183 с.
7. Андреєва О.А. Особливості шкірянохутрової сировини : монографія / Андреєва О.А., Грищенко І.М., Зварич І.Т. – К. : Світ успіху, 2018. – 451 с.
8. Касьян Е.Є. Основи технології шкри та хутра : навчальний посібник / Касьян Е.Є. – К. : КДУТД, 2001. – 224 с.
9. Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги : ДСТУ 4239-2003. – [Чинний від 01-10-2004]. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
10. Засоби індивідуального захисту. Взуття професійного призначення. Методи випробування взуття (EN ISO 20344:2004/AC:2005/A1:2007, IDT) : ДСТУ EN ISO 20344:2009. – [Чинний від 2012-01-01] – К. : Держспоживстандарт України, 2012. – 32 с. – (Національний стандарт України).
11. Засоби індивідуального захисту. Взуття побутового призначення. Технічні умови (EN ISO 20345:2004/AC:2007/A1:2007, IDT) : ДСТУ EN ISO 20345:2009. – [Чинний від 2012-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України 2012. – 11 с. – (Національний стандарт України).

References

1. Holovko M.P. Tovaroznavstvo odiahovo-vzuttievykh tovariv : navch. posibnyk / M.P. Holovko [ta in.]. ; Khark. derzh. un-t kharch. ta torhivli. – Kh., 2015. – 459 s.
2. Danylkovych A.H. Innovatsiini tekhnolohii vyrobnytstva shkirianykh i khutrovykh materialiv ta vyrobiv : monohrafiia / A. H. Danylkovych, I. M. Hryshchenko, V. I. Lishchuk [ta in.]. – K. : Feniks, 2012. – 344 s.
3. Deiaki pytannia pererobky tovariv za mezhamy mytnoi terytorii Ukrainy ta vnesennia zmin do postanovy Kabinetu Ministriv Ukrainy : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy № 461 vid 21.05.2018 r. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/879-2013-%D0%BF
4. Izovit T. Tendentsii rozvytku ukrainskoho rynku vyrobnytstva shkiry / T. Izovit, I. Naumenko // Lehka promyslovist. – 2015. – № 4. – S. 2–4.
5. Ofitsiinyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy / Statystychna informatsiia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.ukrstat.gov.ua.
6. Baidakova L.I. Tovaroznavstvo. Neprodovolchi tovary: vzuttievi i khutriani vyroby / Liudmyla Ivanivna Baidakova. – K. : Vyshcha shkola, 2007. – 183 s.
7. Andreieva O.A. Osoblyvosti shkirianokhutrovoi syrovyny : monohrafiia / Andreieva O.A., Hryshchenko I.M., Zvarych I.T. – K. : Svit uspikhu, 2018. – 451 s.
8. Kasian E.Ie. Osnovy tekhnolohii shkry ta khutra : navchalnyi posibnyk / Kasian E.Ie. – K. : KDUTD, 2001. – 224 s.
9. Materialy ta vyroby tekstylni i shkiriani pobutovoho pryznachennia. Osnovni hihiienichni vymohy : DSTU 4239-2003. – [Chynnyi vid 01-10-2004]. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. – 24 s.
10. Zasoby indyvidualnoho zakhystu. Vzuttia profesiinoho pryznachennia. Metody vyprobuvannia vzuttia (EN ISO 20344:2004/AS:2005/A1:2007, IDT) : DSTU EN ISO 20344:2009. – [Chynnyi vid 2012-01-01] – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2012. – 32 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
11. Zasoby indyvidualnoho zakhystu. Vzuttia pobutovoho pryznachennia. Tekhnichni umovy (EN ISO 20345:2004/AS:2007/A1:2007, IDT) : DSTU EN ISO 20345:2009. – [Chynnyi vid 2012-01-01]. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy 2012. – 11 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

Рецензія/Peer review : 17.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Чупринка В.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-70-74
УДК 685.34.03:620.17

С.Є. КАМЕНЕЦЬ, А.І. ТІХОВА
Київський національний університет технологій та дизайну

ВИКОРИСТАННЯ В ШКІРГАЛАНТЕРЕЙНИХ ВИРОБАХ ТА ВЗУТТІ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

В статті представлені результати дослідження фізико-механічних властивостей екологічно чистого матеріалу – рослини аїр (інші назви лепеха, татарське зілля) – та способів його застосовування з метою використання його естетичних, лікувальних та практичних властивостей у галантерейній та взуттєвій промисловості, виявлені недоліки матеріалу та запропоновані способи їх усунення.

Ключові слова: *аїр, еко-матеріал, порівняння, взуттєва промисловість, плетіння.*

S.E. KAMENETS, A.I. TIKHOVA
Kyiv National University of Technology and Design

APPLICATION IN LEATHER GOODS AND SHOOTING OF NEW ECOLOGICAL MATERIALS AND MODERN MODELS OF THEIR MODELLING

The purpose of the work is to substantiate the use of environmentally friendly material of blanks of air plants (other names: tortoise, Tatar potion) with the purpose of applying its aesthetic, medicinal and practical properties, in haberdashery and footwear industries; comparison of its physical and mechanical properties with traditional materials of shoe production; analysis of possible shortcomings of the selected material, as well as formulation of proposals for elimination and / or improvement of their properties for the further introduction of air in the industry. Methods of comparison, analysis, synthesis, classification, measurement, selection, observation and mathematical calculations were used to achieve the result, based on the results obtained from the following experiments: determination of the tensile strength and elongation of pure and wicker in different forms strands of braiding, duplicated with and without linen fabric. The results of the work are a number of identified shortcomings and positive properties of air and its products, so analysing them we have the following conclusions: Pure air has a low elongation limit, and its strength is close to that of a shoe box, so it is advisable to offer a wicker air. It is most appropriate for the insert insole to use horizontal sheathing of the horizontal direction, duplicated by a layer of linen fabric; we recommend wearing insoles in spring, fall and winter; select the size of the weave individually; large weave used in home shoes; the weave is quickly erased, so it is advisable to use durable and hygienic duplicate material on both sides; to increase flexibility and comfort, as well as reduce thickness, reduce the size of the weave. As a result of using air as a material for the manufacture of loose hygienic insole, for the first time, a number of experiments were conducted to determine the advantages and disadvantages of the air material as that which will be used in haberdashery, footwear and garment industries, namely: Organoleptic, aesthetic and utilitarian evaluation of non-wicker and wicker samples of air; Study of physical, mechanical, material properties, as well as surface density and ability to interact with other materials that are accompanied by the manufacture of footwear and haberdashery; Proposed ways of improving the properties of air products with their further introduction into the shoe and haberdashery industry.

Keywords: air, eco-material, comparison, shoe industry, weaving.

Постановка проблеми

У зв'язку з глобальними екологічними проблемами та актуальністю використання екологічно чистої сировини для виготовлення взуттєвих та галантерейних виробів вперше запропоновано застосовувати екологічно чисту рослину аїр у якості матеріалу при виробництві взуттєвої та галантерейної продукції.

Аналіз останніх джерел

На сьогоднішній день актуальним є збереження навколишнього середовища, впровадження безвідходного виробництва, запобігання від засмічення планети та ідеї етичної моди. Щодо вирішення екологічної проблеми у fashion-індустрії, рішення полягає у використанні для виробництва натуральної сировини і матеріалів, які можна швидко і просто утилізувати, повторно застосовувати, використання яких мінімізує трудові затрати, дозволяє заощадити кошти та ресурси, а також зменшити кількість сміття [1].

Вимоги до якісного виробника взуття та сумок завжди мали низку критеріїв, де нагальні потреби потенційного споживача та останні віяння моди були у перших пунктах.

На сьогоднішній день, виготовляючи пару взуття чи сумку необхідно враховувати, як цей продукт, процес його виготовлення та утилізація вплинуть на людину та на екологію в цілому, чи відповідатимуть сьогоднішній моралі та вимогам захисту навколишнього середовища. Тому, враховуючи екологічну складову, як одну із важливих та актуальних характеристик майбутнього продукту, вважаємо необхідним її закладати ще в процесі формування ідеї нового виробу. В якості прикладу взято використання у виробництво екологічно чистого матеріалу аїр.

Аїр – матеріал екологічно чистого походження, який активно проростає на берегах річок та озер по всій Україні, легко переробляється і відновлюється, не є дефіцитним і дорогим. Аїр від лат. Ácorus (інші назви – мече корінь, шувар, татарське зілля, лепеха, піявр) – трав'яниста багаторічна рослина зі специфічним запахом, жовтувато-зеленуватого кольору [2]. Використання аїру у промислових цілях сприятиме очищенню водоймищ від його надмірної кількості, звільниться місце для молодої порослі. Так як рослина вільно проростає у водоймах то її заготівля не потребує спеціального дорогого обладнання для вирощування, збирання та обробки. Аїр містить смоли, крохмали, дубильні речовини, ефірні масла, аскорбінову кислоту, слиз, камфору, терпену, барнеол та азарон. Аїр популярний у багатьох країнах світу, застосовують цю рослину у різних сферах життя:

– в парфумерії та косметичній промисловості – додають до шампунів, кремів і мила [3];
– в шкіряній промисловості – застосовують для дублення шкір [4];
– в лікеро-горілчаній промисловості – ароматизують вироби [2];
– в харчовій промисловості – застосовують у якості замінника лаврового листа або імбиру, при засолюванні риби, ароматизації варення, компоту та кондитерських виробів;
– в побуті – плетуть взуття, головні убори, сумки, меблі, кошики [5];
– в медицині – використовують його лікувальні властивості в ліках та добавках;
– в релігії та культурі – використовують у якості оберегу від злих сил у покуті.

Господині на Зелені свята лепехою вистилали підлоги [6], і стійкий запах його тримався в хатах майже до зими, застилали глинобитні підлоги хат для дезінфекції та ароматизування [7].

Рослина має багато лікувальних властивостей: затримує ріст стафілококів та грибків, лікує артрит, істерію, кашель, застуду, безсоння, невралгію, аритмію, болі в м'язах, використовується при пародонтозі, в гінекології, в якості загоювального та дезінфікуючого засобу, тонізує, чистить та вирівнює шкіру, попереджує випадання волосся та появу лупи, сприяє загоюванню рубців. При порушеному кровообігу та зниженому тиску рекомендується робити аїрові ванни для ніг та рук, тому татарське зілля здавна широко застосовували у народній та традиційній медицині для лікування ряду хвороб [8]. Використовують аїр для інгаляції, а також для ароматизації та дезінфекції приміщень.

Мета дослідження. Ціллю роботи є обґрунтування використання екологічно чистого матеріалу заготовок рослини аїр (інші назви: лепеха, татарське зілля) з метою застосовування його естетичних, лікувальних та практичних властивостей, у галантерейній та взуттєвій промисловості; порівняння його фізико-механічних властивостей з традиційними матеріалами взуттєвого виробництва; аналіз можливих недоліків обраного матеріалу, а також формування пропозицій щодо усунення та/або покращення їх властивостей для подальшого впровадження аїру в промисловість.

Виклад основного матеріалу

Останні роки модним є застосування плетених аксесуарів з природних матеріалів, особливо в сумках та головних уборах літнього сезону. При відповідній обробці та плетінні аїр демонструє високі естетичні властивості, тому широко використовується у художньому плетінні.

Але досі не були вивчені фізико-механічні властивості аїру і можливості застосування його для виготовлення деталей взуття та галантерейних виробів. Для вивчення особливостей обраного еко-матеріалу, були проведені дослідження з метою визначення міцності та межі розтягнення у порівнянні з традиційними матеріалами, такими як устілковий картон та повсть, що широко використовуються у взуттєвій промисловості [9–11].

Результати експерименту показали (рис. 1), що найменш здатним до подовження виявився картон (відносне подовження 0,4–0,7) але сила, що призвела до руйнування зразка склала 33,1–36.9 кН, що свідчить про те, що матеріал найміцніший, порівняно з аїром та повстю, так як для розриву повсті зусилля розриву склало 4,4–6,2 кН, а для розриву аїру 19,5–22,3 кН. Також виявилося, що повсть здатна до значного розтягування (відносне подовження 1,03–1,42), що обумовлено структурою валяного полотна. Показники подовження аїру підтвердили попередні припущення: здатність до подовження виявилася середньою серед матеріалів, що досліджувалися (відносне подовження 0,6–0,91) [12].

Рис. 1. Показники фізико-механічних властивостей аїру, взуттєвого картону та повсті

Результати експерименту були оброблені методами математичної статистики і був виявлений кореляційний зв'язок досліджених показників і лінійна залежність між ними.

За допомогою регресійного аналізу були розраховані коефіцієнти рівнянь, що описують процес розтягування і руйнування досліджуваних матеріалів (1):

$$y(x) = 14.25 * x - 0.29 \quad \text{- повсть;}$$
$$y(x) = 69 * x + 0.62 \quad \text{- картон;} \qquad (1)$$
$$y(x) = 31.56 * x + 1.28 \quad \text{- аїр.}$$

Отже, у відповідності до отриманих результатів аїр не може використовуватись у чистому вигляді для виготовлення деталей в легкій промисловості так як має низьку тягучість, та є крихким, що зводить

нанівець середні показники міцності. Тому доцільно використовувати аїр у плетеному вигляді, що значно підвищить його фізико-механічні властивості.

Наступним етапом вивчення властивостей аїру є порівняння його у плетеному вигляді з традиційними матеріалами і визначення граничної міцності та здатності до розтягнення. Для цього були виготовлені зразки розміром 15×2,5 мм (робоча поверхня 10×2,5 мм), різного напряму плетення (горизонтально та по діагоналі), та зміцнені лляною тканиною (рис. 2).

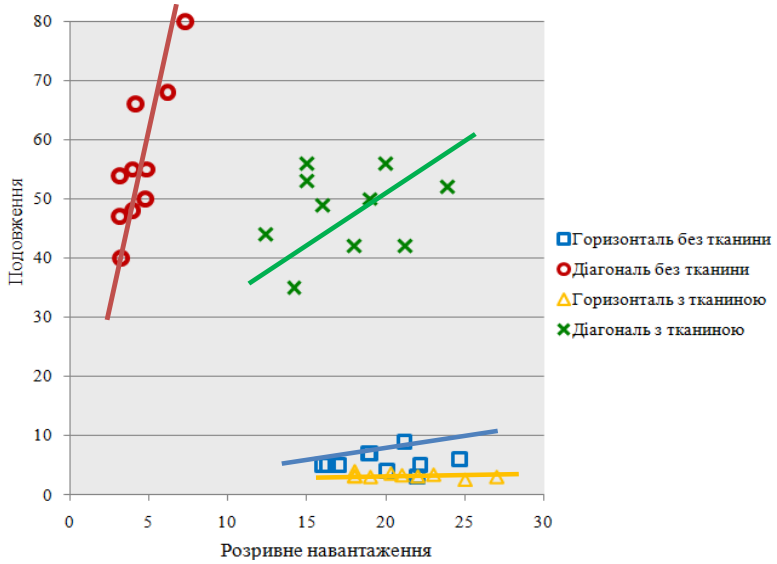


Рис. 2. Показники фізико-механічних властивостей зразків з аїру різного плетіння

За результатами досліджень, можна зробити висновок, що найміцнішим виявився аїр у плетенні в горизонтальному напрямку армований тканиною (18–27 кН) а показники подовження виявилися найменші (відносне подовження 0,25–0,45), що обумовлено шаром тканини; найслабшими виявилися зразки діагонального напрямку без льону (3,2–7,3 кН), але найбільш здатним до подовження(відносне подовження 0,4–0,8). Висока здатність до подовження продовжує зберігатися у діагонально плетених зразках, навіть після дублювання(відносне подовження 0,35–0,56), показники міцності, порівняно з іншими зразками середні (12,4–23,9 кН). Горизонтально плетені зразки без льону мають наступні показники еластичності (відносне подовження 0,3–0,9), міцністю поступаються лише зразкам горизонтального плетіння з тканиною (16,3–24 кН). Результати експерименту були оброблені методами математичної статистики і був виявлений кореляційний зв'язок досліджених показників і лінійна залежність між ними.

За допомогою регресійного аналізу були розраховані коефіцієнти рівнянь, що описують процес.

для аїру горизонтального плетення без тканини вони становлять $y(x) = 38.309 * x + 0.209$,

для аїру горизонтального плетення з тканиною $y(x) = 67.84 * x - 0.79$,

для аїру діагонального плетення без тканини $y(x) = -1.718 * x + 0.19$, (2)

для аїру діагонального плетення з тканиною $y(x) = 34.84 * x + 0.366$.

Результати експерименту показали, що властивості армованого горизонтально плетеного полотна найбільш прийнятні для виготовлення устілок [13], так як має найбільші показники міцності та найменшу здатність до подовження, що актуально в процесі експлуатації устілки.

Такі властивості діагонально плетеного аїру як високе подовження дає можливість використовувати полотна для виготовлення сумок, показники міцності якого можна значно поліпшити, дублюючи плетене полотно міцним та еластичним матеріалом, або використовуючи міцну підкладку при виготовленні виробу. А здатність аїру до формування у вологому стані дає можливість надати виробу потрібної форми.

Сьогодні 3D технології надали легкій промисловості нових можливостей і задач. Зокрема, завдяки таким професійним інструментам тривимірного моделювання, як програма Rhinoceros, є можливість втілювати свої ідеї у повному обсязі і візуалізувати їх у цифровому просторі значно швидше та коректніше, у порівнянні з використанням традиційних методів проектування.

Тривимірні технології дали можливість реалізовувати раніше неможливі, технологічно складні проекти, скоротив технологічний ланцюг до мінімуму і повністю автоматизувавши його за допомогою різних способів 3D друку різних деталей, фурнітури та аксесуарів. Завдяки такому підходу з'явилася можливість створювати продукти відштовхуючись від індивідуальних анатомічних особливостей, потреб або відхилень (спортивне та ортопедичне взуття) [14], використовувати нові матеріали і впроваджувати «екологічно-чисті» технології та просто створювати корисні вироби за унікальними технологіями відповідаючи глобальним ідеям і забезпечуючи великий асортимент продукції.

Для оцінки естетичних властивостей плетених деталей і вибору найбільш привабливих, нами були розроблені в Rhinoceros 3D моделі різних способів плетіння (рис. 3).

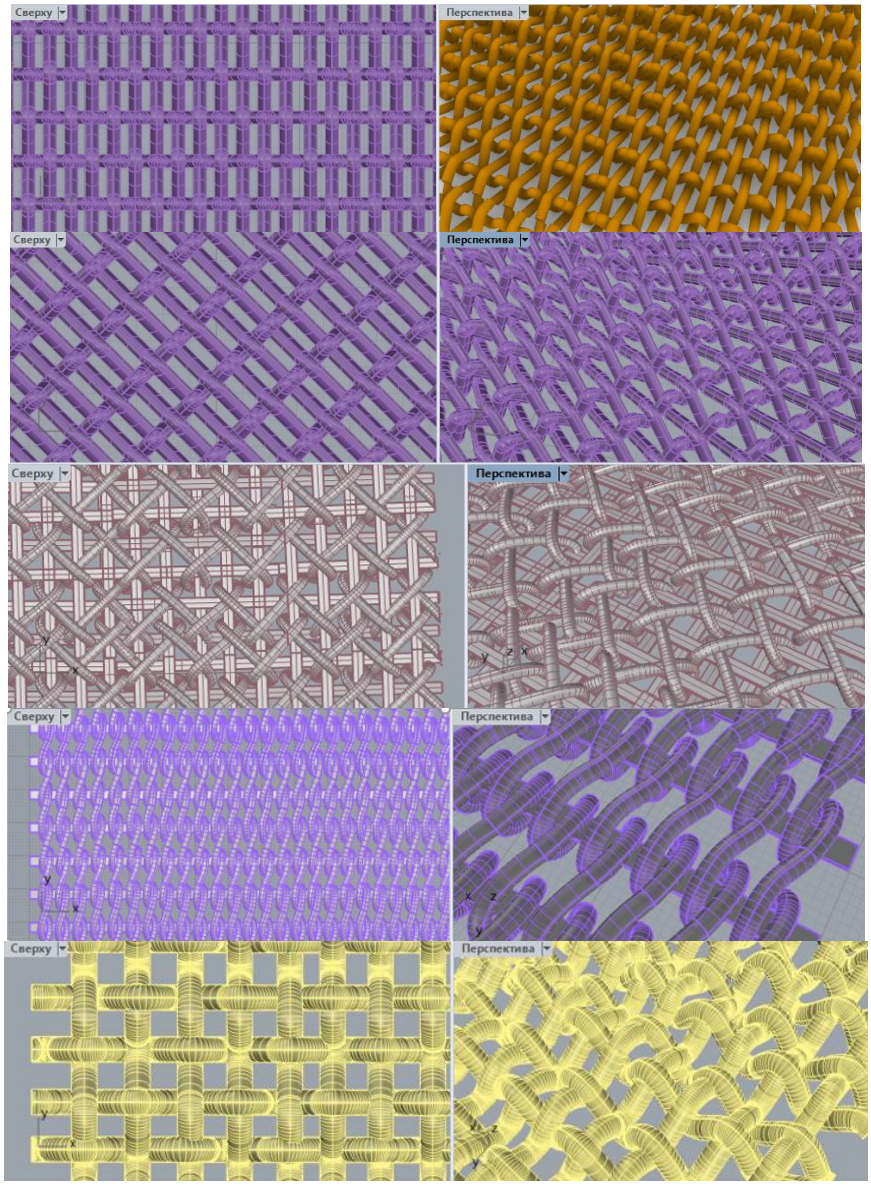


Рис. 3. 3D моделі різних способів плетіння

За технологією NURBS поверхонь нами була розроблена 3D модель устілки, плетеної з аїру (рис. 4). Ця модель не тільки дозволяє візуально оцінити естетичні властивості майбутнього виробу, а і отримати креслення деталей та розрахувати довжину заготовок аїру, щоб уникнути небажаних вузлів всередині деталі при плетінні.

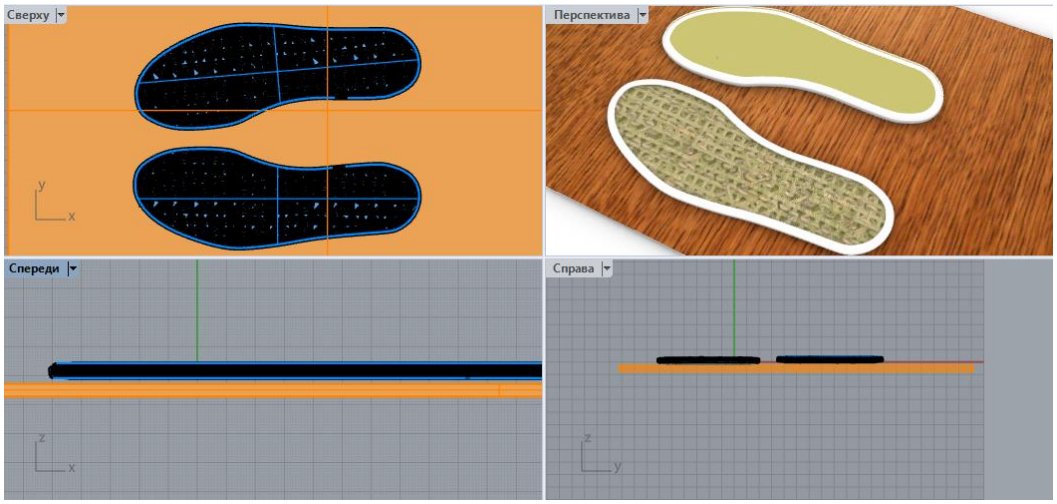


Рис. 4. 3D модель устілки, плетеної з аїру

Висновки

Дослідження властивостей екологічно чистого матеріалу аїр показали, що у необробленому вигляді матеріал непридатний для використання, тому що занадто крихкий та не еластичний, але у разі його використання у вигляді плетеного полотна, поліпшує свої фізико-механічні властивості, тому може застосовуватись у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості. При виготовленні взуття краще за все використовувати заготовки аїру для вкладної плетеної устілки. У плетеному вигляді матеріал досить міцний та у разі дублювання тканиною показники міцності підвищуються, а еластичність можна відкоригувати, використовуючи текстиль з різними властивостями. Доречно для вкладної устілки використовувати плетення горизонтального напрямку, яке є найміцніше і найменше піддається деформуванням, посилене шаром з текстилю. Плетення у діагональному напрямку є більш еластичнішим, тому його можна застосовувати при виготовленні сумок, для яких еластичність є бажаною властивістю.

Застосування 3D технологій дозволяє візуалізувати і оцінити об'єкт проектування ще до виготовлення прототипу, а також отримати шаблони деталей та розрахувати потреби матеріалів, що зменшує час на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва.

Література

1. Рапова О. Альтернативні тканини: з яких матеріалів шиють еко-одяг [Електронний ресурс] // Burdastyle.ua. – 2018. – Режим доступу : https://burdastyle.ua/encyclopedia/gid-po-stylyu/trend/alternatyvni-tkanyny-z-yakyh-materialiv-shyyut-eko-odyag/
2. Аир обыкновенный [Електронний ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аиробыкновенный
3. Большая советская энциклопедия : в 30 т. Т. 20 / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М., 1975. – 608 с.
4. Работнов Т.А. Дикорастущие полезные растения СССР / отв. ред. – М. : Мысль, 1976. – 360 с.
5. Плетение [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ru.wikipedia.org/wiki/Плетение
6. Мой лучший рассказ : [Антология] / [состав. Васильев В.В.]. – М. : Современник, 1989. – 656 с.
7. Мазнев Н.И. Энциклопедия лекарственных растений / Мазнев Н.И. – 3-е изд., испр. – М., 2004. – 496 с.
8. Словник українськи наукових і народних назв судинних рослин / [авт.-уклад. Ю. Кобів]. – К. : Наук. думка, 2004. – 800 с. – (Словники України). – ISBN 966-00-0355-2
9. ГОСТ 6611.2. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве : [Введ. в действие 01.01.1976]. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 1996. – 35 с.
10. ГОСТ ISO 17700-2011. Обувь. Методы испытаний материалов верха обуви, подкладки и вкладних стелек. Устойчивость окраски к трению : [Введ. в действие 01.07.2012]. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2013. – 11 с.
11. ГОСТ 15902.3-79. Полотна нетканые. Методы определения прочности : [Введ. в действие 30.06.1980]. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 1999. – 6 с.
12. Каменець С.Є. Дослідження нових екологічних матеріалів для використання в шкіргалантерейних виробах та взутті / С.Є. Каменець, А.І. Тіхова // Тези доповідей XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів [«Наукові розробки молоді на сучасному етапі»], (Київ, 2019 р.) / Мін-во освіти і науки України, КНУТД. – К. : КНУТД, 2019. – Т. 1. – С. 192–193.
13. Пат. на КМ № 135701 Україна, МПК A43B7/00. Вкладна гігієнічна устілка / Каменець С.Є., Тіхова А.І. ; заяв. та патентовласник КНУТД. – № u201901515 ; заяв.15.02.19 р. ; опубліковано 10.07.19 р., бюл. № 13.
14. Каменець С.Є. Проектування спеціального взуття, для людей з осколковими ураженнями ніг за допомогою сучасних 3d технологій / С.Є. Каменець, Н.С. Кір'янова // Науковий вісник Мукачівського державного університету. – 2016. – № 20 (15). – С. 23–33.

References

1. Rapova Olena. (2018). Alternative fabrics: from which materials sew eco-clothing. Burdastyle.ua. URL: https://burdastyle.ua/encyclopedia/gid-po-stylyu/trend/alternatyvni-tkanyny-z-yakyh-materialiv-shyyut-eko-odyag/
2. https://en.wikipedia.org/wiki/ Air ordinary
3. The Great Soviet Encyclopedia: in 30 vols. Vol. 20: Fee — Prob. Chap. ed. AM Prokhorov. 3rd ed. M.: Sov. Encycl., 1975. 608 p.
4. Rabotnov T. Wild growing useful plants of the USSR. Open row. M., 1976. 360 p.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Network
6. My best story is: [Anthology]. Composition. Vasilyev V.V. M.: Contemporary. 1989. 656 p. ISBN: 5-270-00422-4
7. Maznev N.I. Encyclopedia of medicinal plants. 3rd ed. And extra. M.: Martin, 2004. 496 p.
8. Kobov Yu. Dictionary of Ukrainian scientific and folk names of vascular plants. K.: Nauk. Thought. 2004. 800 p. ISBN 966-00-0355-2
9. Textile threads. Method of breaking the breaking load and elongation at break: GOST 6611.2 Intro. 01.01.1976. M.: STANDARTINFORM, 1996. 35 p.
10. Shoes. Test methods for shoe uppers, lining and insoles. Friction resistance to friction: GOST ISO 17700-2011. Intro. in operation 01.07.2012. M.: STANDARTINFORM, 2013. 11 p.
11. The cloths are nonwoven. Strength determination methods: GOST 15902.3-79. Intro. 30.06.1980. M.: STANDARTINFORM, 1999. 6 p.
12. Kamenetz SE, Tikhova AI Research of new environmental materials for use in leather goods and footwear. Abstracts of the 18th All-Ukrainian Scientific Conference of Young Scientists and Students ["Scientific Development of Young People at the Current Stage"], (Kyiv, 2019) / M-of Education and Science of Ukraine, KNUTD. - K .: KNUTD, 2019. - Vol.1. Pp. 192–193
13. Patent. IPC (2018.01): A43B1700. INCLUSIVE HYGIENE INSOLE. Tikhova A.I., Kamenets S.E.
14. Kamenets S.E., Kiryanova N.S. Designing special footwear for people with shrapnel with modern 3D technology. Mukachevo State University Scientific Bulletin No. 20 (15) '2016, p. 23–33.

Рецензія/Peer review : 7.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Чупринка В.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-75-79
УДК 685.34

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ, Я. ЦИМБАЛ
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕТРИКІВСЬКОГО РОЗПИСУ

В статті розглянуто стан ринку вітчизняного взуття, наведено результати досліджень можливості використання елементів петриківського розпису для оздоблення та декорування виробів зі шкіри, розроблено асортимент жіночого взуття з елементами декорування, виготовлено дослідний зразок, наведено результати маркетингових досліджень споживчих переваг для розробки асортименту жіночого взуття з елементами декорування росписом, а також з'ясовано, наскільки його асортимент задовольняє потреби населення. Спрогнозовано можливість використання не типових технік і матеріалів для оздоблення і декорування взуття. Розроблено колекцію ескізів різних конструкцій взуття з використанням елементів петриківського розпису, що включає оцінку споживачів щодо актуальності його використання під час виробництва взуття.

Ключові слова: *натуральна шкіра, петриківський розпис, не типові техніки і матеріали, оздоблення, декорування, ринок взуття, маркетингові дослідження, споживчі переваги, попит, респонденти, сегментація, якість.*

A. I. BABYCH, V. P. KERNESH, J. CIMBAL
National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF WOMEN'S FOOTWEAR ASSORTMENT WITH THE USE OF PETRYKIVKA PAINTING ELEMENTS

Modern successful business requires constant updating of the product offer, so first of all the urgent problem is the production and launch of interesting and modern designs on the market of goods, the updated range of innovative or not typical materials, the use of elements of decoration and decoration of products. The analysis of the domestic footwear market and the world experience allow us to confirm the fact that in developed market economies, domestic demand should be oriented to the goods of domestic and not foreign manufacturers. This applies, in particular, to the footwear industry, for which the recovery of demand for domestic footwear is essential for enterprises to ensure their effective functioning. It is very difficult to increase the interest of the modern consumer in domestic production and, accordingly, the demand for these products. As the modern consumer is a person who leads an active lifestyle, travels, has access to information from an online resource, has high standards of living, and therefore has high requirements for the quality and appearance of products. She wants to be a modern, creative, fashionable person and have products that meet her requirements and preferences. Today in the world is a fashion for everything Ukrainian and who, not us, Ukrainians, should use this opportunity to inform the world about our traditions, culture, painting techniques, crafts, having recreated their elements in products. The development and implementation of new products, as well as the modification and transformation of the existing product range, greatly contribute to the balance of supply and demand. If the consumer quality of a new product meets the requirements of market entities – consumers of this product, then it wins a strong position in the market. The article deals with the state of the domestic footwear market, presents the results of studies of the possibility of using elements of Petrykivka painting for decoration and decoration of leather products, developed an assortment of women's shoes with elements of decoration, produced a test sample, presents the results of marketing research on consumer preferences for the development of assortment items mural, and also found out how its range meets the needs of the population. The possibility of using non-standard techniques and materials for the decoration and decoration of shoes is predicted. A collection of sketches of various shoe designs using elements of the Petrykivka painting has been developed, which includes the assessment of consumers as to the relevance of its use in the production of shoes.

Keywords: genuine leather, Petrykivka painting, not typical techniques and materials, decoration, decoration, footwear market, marketing research, consumer preferences, demand, respondents, segmentation, quality.

Вступ

Сучасний успішний бізнес вимагає постійного оновлення товарної пропозиції, тому насамперед актуальна проблема виробництва і випуску на ринок товарів цікавих і сучасних конструкцій, оновленого асортименту з інноваційних або не типових матеріалів, використання елементів декорування і оздоблення виробів. Аналіз вітчизняного ринку взуття і світовий досвід дозволяють стверджувати той факт, що в країнах із розвиненою ринковою економікою внутрішній попит повинен бути зорієнтований на товари вітчизняних, а не закордонних виробників. Це стосується зокрема, взуттєвої галузі, для підприємств якої пожвавлення попиту на вітчизняне взуття є суттєвим важелем забезпечення їх ефективності функціонування.

Підвищити цікавість сучасного споживача до товарів вітчизняного виробництва і відповідно попит на ці товари дуже складно. Оскільки сучасний споживач – це людина, яка веде активний спосіб життя, подорожує, має доступ до інформації з інтернет-ресурсу, має високі стандарти життя, тому відповідно має і високі вимоги до якості і зовнішнього вигляду виробів. Вона хоче бути сучасною, креативною, модною людиною і мати вироби, що відповідають її вимогам і вподобанням. Сьогодні у світі мода на все українське і хто, як не ми, українці, маємо використати цю можливість для інформування світу про наші традиції, культуру, техніки розпису, ремесла, відтворивши їх елементи у виробах. Розробка і впровадження у виробництво нових товарів, а також модифікація і трансформація існуючого асортименту виробів багато в чому сприяють збалансованості попиту та пропозиції. Якщо споживча якість нового товару відповідає вимогам суб'єктів ринку – споживачів цього товару, то він завойовує міцні позиції на ринку [1–7].

Постановка завдання

Петрикі́вський ро́зпис, або «петрикі́вка» – українське декоративно-орнаментальне народне малярство, яке сформувалося на Дніпровщині в селищі Петриківка, звідки й походить назва цього виду мистецтва. Окремі речі з візерунками в стилі петриківського розпису збереглися ще з XVIII століття. Однак у сучасному розумінні цей напрям сформувався наприкінці XIX століття – на початку XX століття. Походження

петриківського розпису пов'язують з козацтвом і заселенням Дніпровщини вихідцями з Полтавщини, Слобожанщини та Поділля у XVIII столітті та в першій половині XIX століття. Проте невідомо, де й коли саме розвинулися традиції, що лягли в основу цього напряму малярства. Петриківський розпис – не лише народне мистецтво, що зберігає традиції оздоблення українського житла, але й сучасний живопис, який розвивається та набуває нових рис.

Визначальними рисами розпису, що відрізняють його від інших подібних видів малярства (наприклад, від українського опішнянського розпису та від російського традиційного хохломського розпису і федоскінської мініатюри), є техніка виконання, візерунки, їх кольори та біле тло. У 2012 році Міністерство культури України визначило петриківський розпис об'єктом нематеріальної культурної спадщини України. 5 грудня 2013 року Петриківський розпис було включено до Списку нематеріальної культурної спадщини людства ЮНЕСКО. Вивчаючи історію України і ремесел, народилася тематика наукового дослідження про можливість використання петриківського розпису класичного і стилізованого у декоруванні і оздобленні виробів зі шкіри.

Метою даної роботи є розробка асортименту жіночого взуття з елементами петриківського розпису на основі теоретико-аналітичних досліджень української культурної спадщини та мистецьких ремесел, виготовлення зразків виробу і оцінка якості і відповідності виробів вимогам сучасного споживача.

Висвітлення і обґрунтування результатів маркетингових досліджень, визначення факторів вагомості переваг споживачів щодо конструкції, матеріалів, ціни, якості, завдяки чому можливе вдосконалення асортименту виробниками, прогнозування використання сучасних не типових технік і матеріалів для виробництва виробів даного сегменту, поліпшення його якості і збільшення попиту на взуття українських дизайнерів і виробників.

Взуття є елементом костюму, який завершує і підкреслює особливості образу людини в цілому, вказує на її смак, вподобання, соціальний статус, культуру. В умовах сучасного і бурхливого світу кожен хоче бути особливим і мати ексклюзивні й неповторні вироби. Ця задача вирішується за рахунок виготовлення виробів за індивідуальним замовленням в умовах не великих виробництв. Вироби, про які буде йти мова у даній роботі, належать саме до такої категорії, тому що все не типове для масового сприйняття, не може вироблятись на загал, оскільки не буде мати 100% попиту населення і відповідно не буде відповідати необхідній для розвитку бізнесу купівельній спроможності.

Торговий асортимент підприємств великої і середньої потужності неминуче формується під впливом промислового, оскільки можливості виробника визначають склад пропозиції. Однак, в умовах ринкової економіки, безпосередній вплив на промисловий асортимент надає торгівля, орієнтуючись на купівельний попит, схвалюючи або відхиляючи певні моделі.

Основним фактором, що впливає на формування асортименту виробів, є споживчі вподобання. Робота з їх вивчення – важлива складова маркетингової діяльності торгового підприємства [2]. Також однією з стратегічних цілей роботи є впровадження у вироби елементів українського ужиткового мистецтва з метою продовження «життя» традицій і культури українського народу, тому що ми українці, і ми найкращі.

Основна частина

У даній роботі вивчено і проаналізовано конструкції традиційного взуття українських жінок XVIII століття і першої половини XIX століття. Вивчено техніки нанесення петриківського розпису на поверхні з різних матеріалів, інструменти для нанесення малюнку і матеріали.

В процесі дослідження виявлено, що конструктивно взуття поділялось на чоботи, чобітки та черевички. Виготовлялось з не високим каблучком різних форм, носкова частина була овально-заокругленою, наповненою, халявки чобіток та черевичок не мали застібки «блискавки», тому були достатньо широкими для зручності взування. Виходячи з цих відомостей в даній роботі з прив’язкою до сучасних вподобань молоді розроблено ескіз, спроектовано конструкцію виробу – дослідного зразку і виготовлено промисловий зразок, на який нанесено петриківський розпис (рис. 1).

Рис. 1. Промисловий зразок моделі виробу

На основі виготовленого зразка і фор-ескізів взуття з елементами петриківського розпису проведено маркетингові дослідження методом анкетування для прогнозування можливості використання не типових технік і матеріалів при оздобленні і декоруванні взуття, формуванні асортименту виробів даного сегменту і оцінки думок споживачів за певними критеріями вагомості в цілому. Виявлено з соціологічних досліджень проведених в роботі, що до частих змін моди властиві вироби для жінок та молоді, тому щорічне оновлення асортименту моделей має бути максимальним і відповідним до тенденцій моди. При розробці моделей виробів необхідно враховувати функціональну виразність форми, стильову спрямованість, гармонійну цілісність композиційної структури і досконалість виконання виробу.

На зовнішній вигляд впливають матеріал, форма, силует, конструкція, колір, розмір, якість застосовуваної фурнітури та оздоблення. Естетичні властивості виробів обумовлюються також декоруванням матеріалу чи готового виробу, фактурою матеріалу, кольором чи його відтінком і обробкою.

Вироби можуть бути виготовлені з деталей одного кольору, або з деталей різних кольорів, з одного матеріалу чи різних за складом і фактурою. В якості обробки використовують художнє тиснення, тонування, накладні деталі, фактурні та об'ємні поверхні, ремінці, камені, паєтки, вишивку, розпис тощо. Від коректно і якісно спроектованого виробу залежить зручність і комфортність в процесі його експлуатації.

Істотно впливає на зовнішній вигляд фактура матеріалу і фурнітура, її відповідність призначенню виробу та напрямку моди, тому споживач віддає перевагу, тим виробам, які будуть найбільш повно задовольняти його потребам: функціональним, ергономічним, естетичним, міцнісним. Також вироби мають бути екологічними та безпечними для здоров'я людини та оточуючого середовища.

У ході дослідження була розроблена анкета і опитані фахівці торгівлі на предмет можливості реалізації виробів з розписом та споживачі (рис. 2.а), а саме жінки віком від 18 до 65 років.

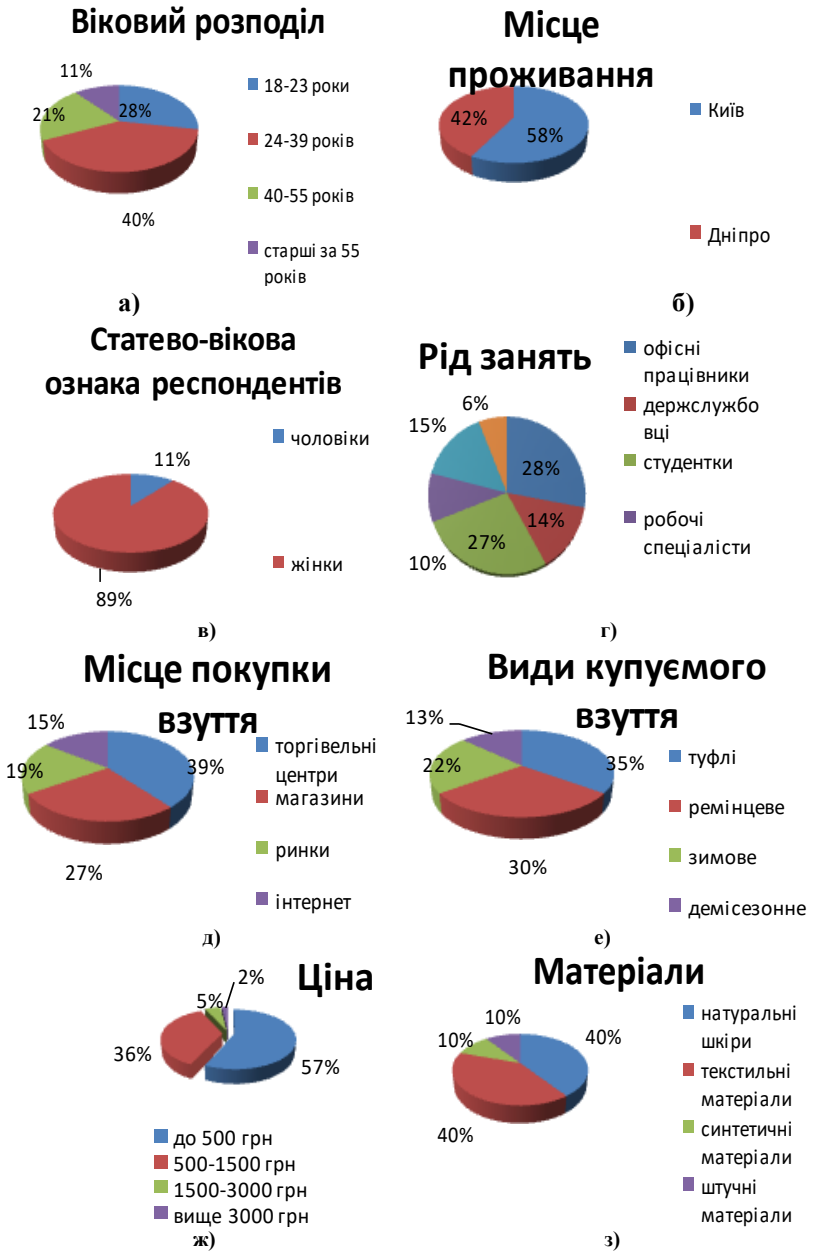


Рис. 2. Результати опитування респондентів при виборі взуття за критеріями споживчого вибору (елементи анкетування (а–з))

Результати дослідження оброблені на персональному комп'ютері з похибкою 4-5%. Анкетування респондентів було проведено в різних районах міста Києва та Дніпра. Всього було опитано 300 осіб, з них у Києві проживає 58%, у Дніпрі 42% (рис. 2.б). Серед опитаних були мешканці міст, приміських зон і областей, які працюють у містах або тимчасово мешкають в них. За отриманими даними, найбільша група споживачів, це жінки віком від 18 до 55 років, що складають в сукупності 89 % покупців і чоловіки 11% (рис. 2.в). Середній загальний дохід на одного члена сім'ї становить 8000 грн. Жінки з вищою освітою склали 30%, 12% – мали не закінчену вищу, 35% – середньо-спеціальну освіту та 23% – середню освіту. Серед опитаних були споживачі різного роду занять: держслужбовці (14%), офісні працівники (28%), студенти (27%), робочі спеціалісти (10%), домогосподарки (15%), безробітні (6%) (рис. 2.г). Протягом останніх п'яти років можна спостерігати тенденцію зміни цінностей і стандартів життя споживачів: збільшення прихильності людей до купівлі виробів різного призначення в магазинах, а не на ринках і лотках, тобто в хороших умовах (наявність примірювальних кабін, продавців-консультантів тощо).

Торгівельні центри та гіпермаркети масово обираються покупцями через зручність розташування декількох магазинів на одній площі та під одним дахом, і орієнтацією на сімейних покупців, в т.ч. на покупців з дітьми, яких приваблюють ігрові кімнати, кафе тощо.

Достатня кількість населення взагалі замовляє вироби в мережі Інтернет з доставко до будинку чи поштою (частка таких покупок досягає 15%). І це стосується як продовольчих так і не продовольчих товарів. Інтернет-торгівля в Україні стає головним конкурентом звичайних магазинів. Часто покупці бронюють вироби в інтернет-магазинах з подальшою приміркою і придбанням та оплатою на місці. На питання анкети «Де ви переважно купуєте взуття?» отримано наступні відповіді від респондентів, наведені в діаграмі (рис. 2.д).

Найчастіше в мережі Інтернет купують споживачі вікової групи 18–38 років, ця ж група людей і покупці до 58–60 років найбільше купує вироби в торгових центрах, старші ж жінки частіше купують на ринках і магазинах за звичкою, а також оскільки не витримують шаленого ритму сучасних торгових центрів, а інтернетом не користуються.

Для більшості опитуваних не має значення вітчизняний товар чи імпортний – 65%, лише 20% налаштовані на покупку імпортного, а 15% – лише українського виробництва. Багато з опитуваних зазначали, що із задоволенням би купували українське, зважаючи на ціну і якість, однак товар не представлений в місцях, де вони зазвичай купують. 46% опитуваних змогли назвати хоч однин бренд українського взуття і українського виробника, найчастіше респонденти називали марку Міда запорізької взуттєвої фабрики, далі йдуть марки Inblu, Romani, також споживачі називали такі бренди українського взуття, як Bistfor, Прайм Шуз, Kasandra, DiMax, Modus Vivendi. Незважаючи на те, що опитування стосувалось лише жіночого взуття, деякі жінки називали українські марки, що випускають взуття лише для чоловіків. Це пов'язано з тим, що жінки часто купують взуття для чоловіків і дітей.

Лідируюче положення за частотою покупок жіночого взуття займають туфлі (35 %), далі йдуть босоніжки і сандалії (30 %), зимові чоботи і черевики (22 %) демісезонні чоботи і черевики (13 %) (рис. 2.е), Все більше, на жаль, стає популярним дешеве балонієве взуття серед різних вікових категорій покупців. І це пов'язано з не високими доходами українців у своїй загальній масі. Тренд сезону – кросівки – також відтіснив на задній план модельне і повсякденне взуття, але це тимчасові відхилення.

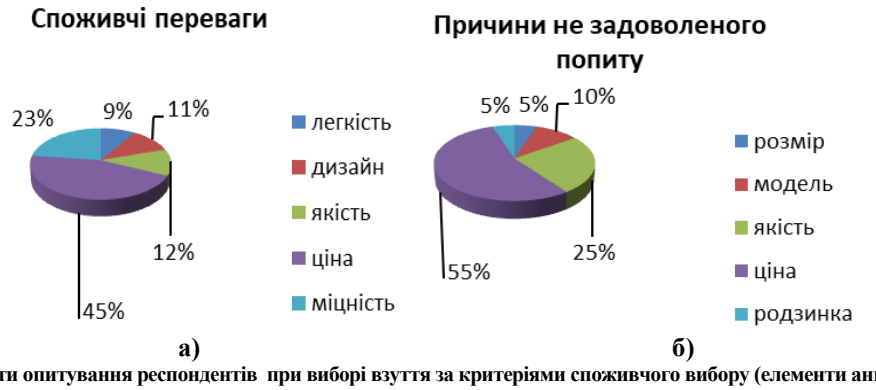
Переважна більшість жінок надає перевагу повсякденному стилю взуття, так званому Casual (57%), 25% обирає ділове взуття і 18 % – спортивне.

Більшість респонденток купують взуття виключно в сезон (65 %), 30 % – в кінці сезону, коли надаються значні знижки, для 5 % не має значення коли купувати. Зазвичай для придбання пари взуття жінки обходять декілька магазинів чи салонів, цікавляться асортиментом і цінами в інтернет-магазинах.

У загальній структурі покупок взуття нижнього цінового сегменту становить 57%, середнього цінового сегменту – 36 %, високого – 5 % і цінового сегменту преміум – 2 % (рис. 2.д).

Хоча споживачі стали вимогливішими до якості продукції, ціновий фактор все ж домінує при виборі взуття. Під якістю взуття українські жінки мають на увазі цілий ряд факторів, але головні з них – це якість використаних матеріалів, зовнішній вигляд (стиль, колір, фасон), бренд виробника.

Окрім того, респонденти вказали, що звертають велику увагу на зручність взуття, його надійність і довговічність.



а) б)

Рис. 3. Результати опитування респондентів при виборі взуття за критеріями споживчого вибору (елементи анкетування (а, б))

Згідно з рис. 3.а, респонденти на перше місце за важливістю показників споживчих переваг взуття поставили ціну (45%), для 12% найважливішим показником є комфортність і зручність, 11% вважає, що головне – це дизайн, 23% – міцність, 9 % – легкість. Було досліджено вплив матеріалу верху взуття на попит [3]. Виявлено, що найбільший попит має взуття з верхом із натуральної шкіри (40%), взуття з верхом із текстилю обирають 40% опитуваних респондентів, із синтетичних матеріалів – 10%, зі штучних матеріалів – 10% відповідно до рис. 2.з. Під час опитування виявлена група споживачів, які не задоволені асортиментною структурою пропозиції магазинів та мають нереалізований попит – 20%, тобто платоспроможні споживачі, які мали намір купити взуття, не знайшли відповідної пропозиції. Частка таких, що не зовсім задовольнили свій попит покупок становить 18%. За результатами проведених досліджень були виявлені причини незадоволеного попиту, що зазначені на рис. 3.б, а саме 25% респондентів назвали головною причиною незадоволеного попиту якість взуття, 55% – високу ціну, 5% – відсутність потрібного розміру чи так звані маломірки, 10% – незадоволення фасоном і моделями взуття, 5% – не знайшли родзинки у виробах. Така велика кількість споживачів, що не змогли задовольнити свій попит, пояснюється недосконалою системою просування взуття на ринку, відсутністю швидкого відгуку на запити споживача і моди. Одним з важливих шляхів вирішення цієї проблеми є аналіз потреб споживачів і підвищення конкурентоспроможності вітчизняного взуття шляхом формування асортименту на виробництві, враховуючи фактори споживчого вибору.

З урахуванням найбільш вагомих критеріїв розроблено ескізний ряд моделей взуття для жінок з елементами петриківського розпису (рис. 4), що забезпечить легкість та вишуканість конструкції, багатофункціональність, можливість максимальної експлуатації та зручності. Єдиний мінус даної розробки полягає в тому, що ціна на вироби не може бути низькою, оскільки вироби ручної роботи є затратними, але від того вони мають свою купівельну нішу.

Рис. 4. Модельний ряд жіночого взуття з елементами петриківського розпису

Висновки

Визначено, що сьогоднішня ситуація на ринку взуття розвивається відповідно до принципів теорії попиту. Наразі в країні склалась доволі сприятлива ситуація для нарощування виробництва і розвитку малого і середнього бізнесу. Останні декілька років суттєво змінилися фактори, за якими український споживач вирішує купувати взуття. В пріоритеті залишаються індивідуальність і ручне виробництво одиничних виробів чи виробів малих серій, а також ціна і якість. Перспективами подальших досліджень у цьому напрямі є визначення фізико-механічних параметрів матеріалів і виробів з нанесенням петриківського розпису, розробка конструкторської документації на виріб, виготовлення зразків, їх апробація та надання пропозицій підприємствам з виробництва жіночого взуття щодо використання сучасних матеріалів і технік декорування, розширення асортименту й удосконалення якості виробів, згідно з попитом і побажаннями споживачів.

Література

1. Бородиня О. Щодо взуттєвого ринку України / О. Бородиня // Легка промисловість. – 2012. – № 3. – С. 21-22.
2. Гаркавенко С.С. Маркетинг : підручник / Гаркавенко С.С. – Київ : Лібра, 2002. – 705 с.
3. Долженко М.В. Дослідження фізико-механічних характеристик шкіряних матеріалів в процесі виготовлення та експлуатації взуття / М.В. Долженко, С.С. Гаркавенко, А.І. Бабич // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2017. – № 2. – С. 12–20.
4. Сайт державного комітету статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ukrstat.gov.ua
5. Стопа и рациональная обувь [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.medical-enc.ru/stopa/rol-kabluka-v-konstrukcii-obuvi.shtml
6. Михайловська О.А. Визначення факторів впливу конструкцій взуття на стопу людини / О.А. Михайловська, А.В. Мостовюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 5. – С. 125–128.
7. Коуплэнд Г. Все о здоровье ваших ног. От младенчества до старости / Г. Коуплэнд, С. Соломон. – М. : АСТ, 2008. – 224 с.

References

1. Borodynia O. Shchodo vzuttievoho rynku Ukrainy / O. Borodynia // Lehka promyslovist. – 2012. – № 3. – S. 21-22.
2. Harkavenko S.S. Marketynh : pidruchnyk / Harkavenko S.S. – Kyiv : Libra, 2002. – 705 s.
3. Dolzhenko M.V. Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk shkirianykh materialiv v protsesi vyhotovlennia ta ekspluatatsii vzuttia / M.V. Dolzhenko, S.S. Harkavenko, A.I. Babych // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2017. – № 2. – S. 12–20.
4. Sait derzhavnoho komitetu statystyky Ukrainy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.ukrstat.gov.ua
5. Stopa i racionalnaya obuv [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: http://www.medical-enc.ru/stopa/rol-kabluka-v-konstrukcii-obuvi.shtml
6. Mykhailovska O.A. Vyznachennia faktoriv vplyvu konstruktsii vzuttia na stopu liudyny / O.A. Mykhailovska, A.V. Mostoviuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2012. – № 5. – S. 125–128.
7. Kouplend G. Vse o zdorove vashih nog. Ot mladenchestva do starosti / G. Kouplend, S. Solomon. – M. : AST, 2008. – 224 s.

Рецензія/Peer review : 8.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Чупринка В.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-80-83
УДК 644.314.16

В.Г. ЄФІМОВА, Т.М. ПИЛИПЕНКО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА СКЛАДУ КОСМЕТИЧНОГО ЕМУЛЬСІЙНОГО КРЕМУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАСЛА З КІСТОЧОК ГРАНАТУ ТА ВИВЧЕННЯ ЙОГО ЕМУЛЬСІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Пріоритетним напрямком цього дослідження є пошук нових сполук, що чинять anti-age ефект, покращують зовнішній вигляд та послаблюють старіння шкіри. Відпрацьовано режими отримання косметичного крему типу «пряма емульсія» на основі суміші неіоногенних емульгаторів. В якості активної речовини використовується масло з кісточок гранату, яке діє через місцеве застосування та надає більш переваг в порівнянні зі складом на основі ботулотоксину. Вивчено колоїдну стабільність, термостабільність, pH, розмір часток дисперсійної фази. Встановлено, оптимальні умови розподілу жирової фази за об'ємом емульсійного продукту.

Ключові слова: масло кісточок гранату, неіоногенна поверхнево-активна речовина, емульсія, косметичний продукт, термостабільність.

V.G. YEFIMOVA, T.M. PILIPENKO
National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Polytechnic Institute

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF THE COSMETIC EMULSION CREAM WITH THE APPLICATION OF OIL FROM PRAYER OF GRANNES AND THE STUDY OF ITS EMULSION PROPERTIES

This work is related to the development of the composition of cosmetic emulsion cream based on natural ingredients such as emulsifiers and pomegranate seed oil. It is known that this oil has a thick consistency, but at the same time it helps to cleanse the skin of sebaceous secretion, is a modulator of estrogen receptors, which is of great importance during the period of unbalancing of the hormonal background, and also has a high sun-protection factor. For today's day, I don't have a primed scientific approach when I stock the emulsion cosmetic cream with pomegranate seed oil. So, the scrubbing of cosmetic creams from the country of pomegranate oil, the most up-to-date and the most effective collagen and the elasticity of essential cosmetics, which is an important trend in new cosmetic stores. The task of the job is development of a warehouse for cosmetic emulsions based on natural Ingredients, organically sensible and emulsive powers. The criteria and indicators of the brightness of a cosmetic cream are: organoleptic and sensory authorities, thermostats and colloids, pH and droplets of the fat phase, are different in cosmetic cream. As a result this job is, the way to remove a cosmetic product has been developed, organoleptic and emulsive power were studied. The cosmetic product was prepared in a hot / hot way. Thus, it was established that the most optimal dispersion of the fat phase for the frequency of wrapping is attached, which I can change 300–400 hv-1. To lower the number of turnovers, it is necessary to finish until the emulsion is removed with a wide interval for the selection of the particles of the dispersed phase, and the greater part is visible until the mass is recovered from the emulsion mass, which can be used to clean the cosmetic. Emulsified cosmetic, which products were obtained from the Ukrainian emulsifiers Olivem 2020 and Nature Mulse may have a higher stability and thermal stability. For the minds of sowing at a distance of 60 db, the water indicator is practically not possible to change like a preservative, so without the need to know about the absence of oxidative processes in the emulsion, so as to bring finished products to fruition. Victoria in the formulation of a cosmetic cream oil pomegranate seeds at the number of 15% do not underestimate the emulsion power.

Keywords: *surface-active substance, adsorption equilibrium constant, emulsifier, cosmetic product, emulsion, pomegranate seed oil.*

Вступ

Однією з характерних ознак старіння шкіри людини є поява зморшок, причиною утворення яких є безліч факторів, серед яких можна виділити як внутрішні: генетичні, конституційні, гормональні зміни, так і зовнішні, наприклад, харчові та екологічні. Сильний вплив на утворення зморшок надають часто повторювані рухи лицевих м'язів під час сміху, куріння, розмови, прийому їжі і т. д.

Одним із шляхів вирішення проблеми появи зморшок і складок шкіри є вплив на неї такими препаратами, які сприяють відновленню деформаційно пружних властивостей колагену і еластину. Літературні джерела свідчать [1, 2], що використання масла гранатових кісточок у складі anti-age косметичних засобів тонізує процеси у глибинних шарах шкіри та сприяє її відновленню. Отже, розробка науково-обґрунтованого підходу до створення рецептур anti-age емульсійних косметичних засобів з маслом гранатових кісточок є актуальною задачею.

Постановка завдання

Одним із шляхів вирішення проблем появи зморшок є вплив на неї такими препаратами, що здатні відновлювати властивості колагену та еластану.

Літературні дані свідчать, що використання масла кісточок гранату, впливає на біосинтез колагену та еластину [3]. На відміну від ботулінічного токсину, який вводять під шкіру, масло кісточок гранату здатне активно впливати на шкіру через зовнішнє застосування. При цьому воно дешевше і може бути успішно використаним для обробки шкіри у випадках, коли організм виробив імунітет до ботулінічного токсину після його тривалого використання [4].

Таким чином, розробка рецептури косметичних засобів із застосуванням масла кісточок гранату, що уповільнює старіння шкіри та відновлює спроможність колагену та еластану до розтягування та стиснення, є актуальним напрямком досліджень в області створення нових косметичних препаратів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За даними наукових досліджень [5] можна зробити висновок, що використання натуральних рослинних олій у виробництві косметичних засобів anti-age спрямування є пріоритетним напрямком

дослідження емульсійних косметичних продуктів. Вони є універсальними засобами для догляду за шкірою, оскільки проникають у глибинні шари епідермісу та віддаляють початкові процеси старіння. Вони складаються виключно з натуральних компонентів та мінеральних утворень, не містять штучні речовини та барвники. Дослідження [6] свідчать, що використання олії гранатових кісточок у складі косметичного засобу має задовільні практичні результати і має перспективу створення косметичних засобів anti-age спрямування для широкого кола користувачів.

Мета і завдання дослідження

Відпрацювання режимів отримання та розробки складу косметичного крему anti-age спрямування на основі сучасних компонентів із застосуванням масла гранатових кісточок та дослідження його емульсійних властивостей.

Виклад основного матеріалу

Для збереження агрегатованої стійкості емульсії необхідно зберегти досягнуту максимальну дисперсність, знизити величину поверхневого натягу та тим самим надлишок вільної енергії до її мінімального значення. Цього можна досягти за допомогою введення речовин, що мають поверхнево-активну дію, – це так звані емульгатори.

До емульгаторів, що використовуються у виробництві емульсійних косметичних кремів, пред'являються наступні вимоги: спроможність знижувати поверхневий натяг, відсутність взаємодії з активними компонентами, фармакологічна індиферентність.

Для досягнення пом'якшуючої дії та відновлення гідро-ліпідної мантії нами було обрано емульсію 1-го типу. Під час вибору емульгаторів ми обрали класичну схему створення емульсії, де використовуються два типи емульгаторів: гідрофільної природи (1-го типу) – 70% та ліофільної природи (2-го типу) – 30% від загальної кількості емульгаторів.

Сумарна концентрація емульгаторів становила 6%.

Розробку складу косметичного емульсійного засобу проводили з використанням двох неіоногенних емульгаторів – Olivem 2020 (Італія) розчинний у водневій фазі та НатурМульс (BASF, США), розчинний у фазі олії.

Емульгатор Olivem 2020 за міжнародною номенклатурою інгредієнтів (INCI) у своєму складі містить такі речовини:

Ethylhexyl Olivate являє собою емолент, що здатний підтримувати необхідний рівень зволоження шкіри та укріплює її природні бар'єрні функції. Виступає в якості замінника сквалану та сквалену. Чинить пом'якшуючу дію на шкіру та надає гарні тактильні відчуття від косметичних засобів з його використанням.

Sodium Acrylates Copolymer являє собою гелеутворювач та регулятор в'язкості емульгатора. Забезпечує проникнення активних речовин у глибинні шари шкіри.

Polyglyceryl-4 Olivate має властивості емолента.

Цей емульгатор, як і вся його лінійка, базується на оливковому маслі, має максимальну спорідненість зі шкірою, оскільки за комбінацією жирних кислот склад емульгатора ідентичний складу здорового епідермісу.

Емульгатор Nature Mulse за міжнародною номенклатурою інгредієнтів (INCI) в своєму складі має такі речовини:

солі молочної кислоти, що надають йому зволожуючих властивостей, підтримує оптимальний рівень зволоження та перешкоджає втраті вологості шкірою;

Glyceryl Stearate – похідне жирних кислот з рослинних олій та гліцерину, отриманий з пальмоядрової чи соєвої олії. Використовується в якості стабілізатора системи для попередження розшарування інгредієнтів. Чинить на шкіру пом'якшуючу та зволожуючу дії, утримує вологу в шкірі.

Cetearyl Alcohol є згущувачем та стабілізатором в'язкості емульсійних систем, пом'якшує шкіру та утримує вологу.

Отже, Nature Mulse з солями молочної кислоти поєднує в собі догляд, зволоження та живлення.

В якості додаткових інгредієнтів у косметичну емульсію ми вводили віск жасмину, масла зародків пшениці та кісточок гранату.

Віск жасмину у своєму складі містить каротиноїди, вітамін Е, фосфоліпіди. Він буде захищати шкіру тонкою плівкою, що не пропускає повітря та зберігає епідерміс від зайвої втрати вологи, а також буде виступати в ролі ароматизатору керма.

Масло зародків пшениці містить у своєму складі вітамін Е, жирні кислоти, що покращують стан шкіри, підтягують та розладжують її. За антиоксидантною активністю вітамін Е із пшеничних зародків перевершує α-токоферол, β – каротин та вітамін А, а тому може бути легким засобом, що консервує.

Нерафіноване масло гранатових кісточок. Основні хімічні елементи масла кісточок гранату наведені у таблиці 1 [7].

Це масло має густу консистенцію, але при цьому воно не закупорює пори, а навпаки, сприяє очищенню шкіри від накопиченого сального секрету. Його можна віднести до сімейства плівкових, оскільки масло обволікає шкіру без відчуття липкості, захищає та відроджує епідерміс. Оперативно знімає сухість шкіри, особливо у період менопаузи та розбалансування гормонального фону, оскільки пунікова кислота, що входить до складу масла, є селективним модулятором естрогенових рецепторів. За даними роботи [8] встановлено, що масло кісточок гранату збільшує проникність активних речовин у шкіру.

Таблиця 1

Хімічний склад масла кісточок гранату

Складова частина масла	Вміст, %
Жирні кислоти у вигляді тригліцеридів, поліненасичених жирних кислот та фосфоліпідів	До 88
Пунікова кислота	1,3
Тетракозанова кислота	1,4
Кампестерол	0,1
β-Стигмастерол	0,1
γ- Токоферол	1
17-α-естрадіол	0,3

Дослідження [7] показали, що масло кісточок гранту стимулює легке потовщення епідермісу, що в свою чергу сприяє його регенерації. Так, клінічні дослідження крему, що містить масло кісточок гранату, показало, що збільшення товщини дерми становить 14, 85%, а гідратація зростає на 30,32 %, при цьому еластичність збільшується на 9,75% у порівнянні з базовим рівнем.

Сонцезахисний фактор становить 25, що дозволяє зберегти шкіру від агресії ультрафіолету в умовах міста.

Фітостероли, що входять в склад масла, допомагають розгладити шкіру зі зморшками.

Першим етапом наших досліджень було визначення впливу умов отримання косметичної емульсії на колоїдну та термічну стабільності. Рецептура косметичної емульсії представлена у таблиці 2.

Таблиця 2

Хімічний склад масла кісточок гранату

Назва інгредієнту	Вміст інгредієнту, мас.%
Воднева фаза	
Гідролат троянди	75
Жирова фаза	
Olivem 2020	4
Nature Mulse	2
Віск жасмину	1
Масло зародків пшениці	3
Масло кісточок гранату	15

Відпрацювання режимів отримання емульсійного крему здійснювали з використанням механічного пристрою, що перемішує IKA RW 20n.

Емульсійний косметичний засіб отримували наступним чином:

– зважували компоненти жирової фази;

– зважували компоненти водневої фази;

– нагрівали окремо двох фаз до температури 75 ^{0}C;

– водневу фазу додавали до масляної і перемішували з частотою обертання від 200 до 500 хв$^{-1}$.

Таблиця 3

Умови отримання косметичного крему та його властивості

Номер зразка	Умови отримання косметичного засобу		Властивості косметичної емульсії			
1	Швидкість перемішування, хв$^{-1}$	Наявність консерванту	Колоїдна стабільність	Термічна стабільність	pH свіжого засобу та через 60 діб	Розмір частин жирової фази, мкм
2	200	-	Стабільна	Стабільна	6,34/6,45	3-5
3	300	-			6,25/6,67	3-1
4	400	-			6,33/6,42	3-1
5	500	+			6,22/6,41	2-1

Отже, згідно з цією методикою було приготовано чотири зразки косметичного засобу за різної частоти обертання пристрою. Загальна тривалість процесу становила 30 хвилин. Фізико-хімічні дослідження проводили через 24 год після повного охолодження та структурування системи.

Дослідження фізико-хімічних показників емульсійних засобів проводили за стандартними методиками [9, 10]. Результати досліджень наведені у таблиці 3.

Дані таблиці 2 свідчать, що всі зразки емульсійних кремів мають колоїдну та термічну стабільність. На наш погляд, оптимальним значенням швидкості перемішування є частота обертання від 300 до 400 хв$^{-1}$, оскільки за меншої частоти обертання у зразках присутні частинки крупного розміру до 5 мкм, а за більшої швидкості обертання у крем потрапляє повітря, що погіршує якість продукту.

Аналіз водневого показника, показав, що зразки, які отримані з використанням консерванту та без нього, свідчать, що емульсійна система даного складу є стабільною. Таким чином, масло зародків пшениці у складі даного косметичного засобу грає роль як корисної складової частини, так і консерванту.

Висновки

Таким чином встановлено, що найбільш оптимальним є диспергування жирової фази за частоти обертання пристрою, що перемішує 300–400 хв$^{-1}$. Більш низькі обороти призводять до отримання емульсії з широким інтервалом розмірів частинок дисперсійної фази, а більш висові – до захоплення повітря у емульсійну масу, що впливає на якість косметичного засобу.

Емульсійні косметичні засоби, що отримані з використанням емульгаторів Olivem 2020 та Nature Mulse, мають високу колоїдну стабільність та термостабільність. За умов зберігання протягом 60 діб водневий показник практично не змінюється як з використанням консерванту, так і без нього, що свідчить про відсутність окислювальних процесів в емульсії, які призводять до псування готової продукції. Використання в рецептурі косметичного крему олії гранатових кісточок у кількості 15 % не знижує його емульсійні властивості.

Література

1. Shamsuddin A. M., Sekar M., Musa A. Z. Formulation and evaluation of antiaging cream containing mangiferin. International research journal of pharmacy. 2018. Vol. 9, p. 55–58.

2. Singhal M., Khanna S., Nasa A. Cosmeceuticals for the Skin: An Overview. Asian Journal of Pharmaceutical and clinical research. 2011. Vol. 4, p. 1–6.

3. Kwolek M., Block J. Maximizing botulinum toxin injections for cosmetic and therapeutic applications with a single use, disposable, exact dose injection assist device. Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology. 2018. Vol. 12, p. 35–46.

4. Lin T., Zhong L., Santiago J. L. Santiago Anti-Inflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils. International Journal of Molecular Sciences. 2018. Vol. 19, p. 3–21.

5. Sarkar R., Podder I., Gokhale N., Jagadeesan S. Use of vegetable oils in dermatology: An overview. International journal of dermatology. 2017. Vol. 11, p. 45–54.

6. Campa M., Baron E. Anti-aging Effects of Select Botanicals: Scientific Evidence and Current Trends. Cosmetics. 2018. Vol. 5, p. 3–15.

7. Aslam M., Varam J. Pomegranate as a cosmeceutical source: Pomegranate fractions promote proliferation and procollagen synthesis and inhibit matrix metalloproteinase-1 production in human skin cells. Journal of Ethnopharmacology. 2018. Vol. 3, p. 23–31.

8. Yu W., Wang T., Zhu J., Qiu Y., Chen H., Jin Y., Yang X., Hu X., Chang L., Chen Y., Ma G., Lin X.W. EMLA cream does not influence efficacy and pain reduction during pulsed-dye laser treatment of port-wine stain: a prospective side-by-side comparison. 2018. Lasers in Medical Science. Vol. 4, p. 65–74.

9. Кутц Г. Косметические кремы и эмульсии: состав, получение, методы испытаний / Г. Кутц. – М. : Косметика и медицина, 2004. – 267 с.

10. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія / Гомонай В.І. – Вінниця : Нова Книга, 2012. – 496 с.

References

1. Shamsuddin A. M., Sekar M., Musa A. Z. Formulation and evaluation of antiaging cream containing mangiferin. International research journal of pharmacy. 2018. Vol. 9, p. 55–58.

2. Singhal M., Khanna S., Nasa A. Cosmeceuticals for the Skin: An Overview. Asian Journal of Pharmaceutical and clinical research. 2011. Vol. 4, p. 1–6.

3. Kwolek M., Block J. Maximizing botulinum toxin injections for cosmetic and therapeutic applications with a single use, disposable, exact dose injection assist device. Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology. 2018. Vol. 12, p. 35–46.

4. Lin T., Zhong L., Santiago J. L. Santiago Anti-Inflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils. International Journal of Molecular Sciences. 2018. Vol. 19, p. 3–21.

5. Sarkar R., Podder I., Gokhale N., Jagadeesan S. Use of vegetable oils in dermatology: An overview. International journal of dermatology. 2017. Vol. 11, p. 45–54.

6. Campa M., Baron E. Anti-aging Effects of Select Botanicals: Scientific Evidence and Current Trends. Cosmetics. 2018. Vol. 5, p. 3–15.

7. Aslam M., Varam J. Pomegranate as a cosmeceutical source: Pomegranate fractions promote proliferation and procollagen synthesis and inhibit matrix metalloproteinase-1 production in human skin cells. Journal of Ethnopharmacology. 2018. Vol. 3, p. 23–31.

8. Yu W., Wang T., Zhu J., Qiu Y., Chen H., Jin Y., Yang X., Hu X., Chang L., Chen Y., Ma G., Lin X.W. EMLA cream does not influence efficacy and pain reduction during pulsed-dye laser treatment of port-wine stain: a prospective side-by-side comparison. 2018. Lasers in Medical Science. Vol. 4, p. 65–74.

9. Kutc G. Kosmeticheskie kremy i emulsii: sostav, poluchenie, metody ispytanij / G. Kutc. – M. : Kosmetika i medicina, 2004. – 267 s.

10. Homonai V.I. Fizychna ta koloidna khimiia / Homonai V.I. – Vinnytsia : Nova Knyha, 2012. – 496 s.

Рецензія/Peer review : 4.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Чигиринець О.Е.

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-84-91
УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

В.П. МАРЦЕНЮК
Університет в Бєльско-Бялій, Польща
А.С. СВЕРСТЮК, О.М. КУЧВАРА
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського
Н.В. КОЗОДІЙ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Г.П. ШМИГЕР
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ R ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕШІТЧАСТИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФЛУОРЕСЦІЮЮЧИХ ПІКСЕЛІВ В КІБЕРФІЗИЧНИХ БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ

В роботі проведено комп'ютерне моделювання решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакета R. Предметом дослідження є кіберфізична біосенсорна система на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. Метою роботи є дослідження решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакета R. Реалізовано комп'ютерну програму «Комп'ютерне моделювання решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням». Проведено комп'ютерне моделювання досліджуваної моделі, наведено параметри моделі, їх числові значення, а також представлено параметри в пакеті R. Проаналізовано останні дослідження, які стосуються біосенсорів та імуносенсорів, їх видів, та популярність наукових напрямів дослідження протягом останніх років. Незважаючи на величезну різноманітність сучасних фізико-хімічних методів детектування аналітичного сигналу в імуноаналізі найбільш широко використовуються електрохімічні методи, які мають низку незаперечних переваг: висока чутливість і точність, селективність і експресність, невисоку собівартість та універсальність. Описано пакет R як середовище програмування для статистичного аналізу даних із заданими значеннями параметрів моделі біосенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. Наведені посилання на корисні сайти та рекомендації по роботі з пакетом R. Результати решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням дають змогу провести дослідження стійкості моделі біосенсора. За отриманими результатами чисельного моделювання встановлено, що її якісна поведінка суттєво залежить від часу запізнення.

Ключові слова: кіберфізична система, біосенсор, математична модель, диференціальні рівняння, пакет R.

V.P. MARTSENYUK
University in Belsko Biala, Poland
A.S. SVERSTIUK, O.M. KUCHVARA
I. Horbachevsky Ternopil National Medical University
N.V. KOZODII
Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University
G.P. SHMYGER
Ternopil Volodymyr Hnatyuk National Pedagogical University

APPLICATION OF PACKAGE R FOR NUMERICAL SIMULATION OF LATTICE IMAGES OF FLUORESCENT PIXELS IN CYBER-PHYSICAL BIOSENSOR SYSTEMS

The computer simulation of lattice images of fluorescing pixels in a cyberphysical biosensor system on a hexagonal lattice using delayed differential equations using R. The subject of the study is a cyberphysical biosensor system with hexagonal zoning. The aim of this study is to study lattice images of fluorescent pixels in a cyberphysical biosensor system on a hexagonal lattice using delayed differential equations using the R package. The computer program "Computer simulation of fluorescence pixel lattice images in a cyberphysical biosensor system on a hexagonal lattice using delayed differential equations" is implemented. The computer simulation of the studied model is made, the model parameters, their numerical values are presented, and the parameters are presented in the package R. The recent researches concerning the biosensors and immunosensors, their types and the popularity of scientific directions of the research in recent years are analysed. Despite the huge variety of modern physic-chemical methods for detecting the analytical signal in immunoassay, electrochemical methods are widely used, with a number of indisputable advantages: high sensitivity and precision, selectivity and expressiveness, not high cost and versatility. The package R is described as a programming environment for statistical analysis of data with setpoints of the biosensor model parameters on a hexagonal lattice using delayed differential equations. Here are links to useful sites and recommendations for working with R package. The results of the lattice images of fluorescing pixels in a cyber-physical biosensor system on a hexagonal lattice using delayed differential equations make it possible to study the stability of the biosensor model. The numerical simulation results show that its qualitative behaviour is significantly dependent on the delay time.

Keywords: cyber-physical system, biosensor, mathematical model, differential equations, R package.

Вступ

Кіберфізична система (КФС) – фізична система, яка реалізує інтеграцію обчислень та фізичних процесів. Такі системи найчастіше спостерігаються у вигляді вбудованих систем та мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів у системах зі зворотним зв'язком. У таких системах динаміка фізичних процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом [1].

Кіберфізичні системи ототожнюються з проявом четвертої промислової революції, яка відбувається в сучасному світі [2]. Таким чином існує також фізична можливість використання технологій «Internet of Things (Інтернет речей)», де необхідно використовувати сигнали від давачів і вимірювальних приладів. Таким чином, у літературі з'являється все більше публікацій [3], які привертають увагу до сучасних концепцій та пропонують нові інноваційні рішення. А. Платцер запропонував підхід на основі «динамічної логіки», де описано та проаналізовані кібер-фізичні системи [4]. У цих роботах використовуються гібридні програми (ГП) простою мовою програмування з простою семантикою. ГП дають змогу програмісту звертатись безпосередньо до дійсних значень змінних, які представляють реальні величини і визначають їх динаміку.

Мета дослідження. Провести комп'ютерне моделювання решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням.

Аналіз останніх досліджень

Важливим етапом проектування КФС є створення їх математичних моделей, які б адекватно відображали важливі, з точки зору задач дослідження, сторони просторово-часової структури імуносенсорів.

Якість математичної моделі біосенсора суттєво визначає ефективність методів його обробки в КФС, зумовлює рівень інформативності та репрезентативності діагностичних ознак, та зумовлює структуру програмної та апаратної складових проектованої інформаційної системи.

Біосенсори відносяться до аналітичних пристроїв для якісного і кількісного аналізу біологічних компонентів проб, засновані на виявленні специфічних антигенів та антитіл за допомогою імунокомплексів.

Біосенсори, що розробляються і розроблені до теперішнього часу, як правило, використовують гетерогенний формат біоаналізу. Ґрунтуючись на характері механізму детектування, біосенсори можуть бути розділені на електрохімічні, оптичні, п'єзоелектричні та ін. Для кожного типу характерні певні переваги і недоліки, що призводить до великої кількості досліджень з розробки біосенсорів [5].

Незважаючи на величезну різноманітність сучасних фізико-хімічних методів детектування аналітичного сигналу в біоаналізі переважають електрохімічні методи, які мають низку незаперечних переваг: висока чутливість і точність (завдяки унікальному поєднанню специфічної взаємодії антиген-антитіло і чутливої електрохімічної детекції), селективність і експресність, не висока собівартість і універсальність.

Слід зазначити, що основним компонентом всіх біосенсорів є рецепторний шар, що представляє собою антигени, монополіклональні антитіла, або їх фрагменти, певним чином нанесені на робочу поверхню трансдьюсера. Одна з проблем, пов'язана з ефективністю сендвіч-аналізу, на основі антитіл, полягає в можливості взаємодії не тільки з визначеними антитілами, а й іншими імуноглобулінами, що утворюються при різних системних захворюваннях. Ці білки знаходяться в 40% сироватки здорових пацієнтів і можуть призводити до хибних позитивних результатів аналізу. У пошуках альтернативних антитіл, застосовують фрагменти антитіл, аптамери і білкові каркаси неімуноглобулінів [6–8]. Альтернативні молекули повинні задовольняти ряду вимог, а саме: їх необхідно швидко і недорого виготовляти, повинні бути стабільні в різних умовах, мати тривалий термін зберігання. При цьому «замінники» антитіл повинні володіти необхідною чутливістю і специфічністю [9]. Фрагменти антитіл, що володіють високою специфічністю для їх цільового аналіту, здатністю підтримувати розпізнавання антигену, невеликими розміри, в порівнянні з повним антитілом, більш застосовні для іммобілізації, ніж наявні природно сформовані антитіла, і стають важливими інструментами в дослідженні і створенні імуносенсора [10].

У роботі [11] проведено порівняльний аналіз електрохімічних біосенсорів з іммобілізованими антитілами чотирма різними способами (фізичної сорбції, ковалентного зв'язування з застосуванням глутарового альдегіду, ковалентного зв'язування з застосуванням IgG людини і протеїну А). Проведені випробування показали, що найкращими аналітичними характеристиками володіє останній тип сенсорів.

Біосенсор повинен бути багаторазовим пристроєм, оскільки оборотність взаємодії антиген – антитіло може дозволити регенерувати іммобілізований компонент. Однак висока константа афінності і проблема часто необхідних досить «суворих» умов іммобілізації антитіла або антигену роблять регенерацію поверхні важкою для реалізації, тим самим обмежуючи практичне застосування біосенсорів [12].

Виклад основного матеріалу.

Пакет R як середовище програмування для статистичного аналізу даних

Пакет R – це середовище програмування для статистичного аналізу даних, яке складається з базової програми R, що працює як інтерпретатор мови статистичного програмування S, та окремих пакетів, які реалізують спеціальні методи та технології статистичної обробки даних. Програма R є некомерційною і вільно розповсюджується за умови дотримання вимог GNU General Public License [13].

Пакет R застосовується скрізь, де потрібна робота з даними. Це не тільки статистика в вузькому сенсі слова, а й «первинний» аналіз (графіки, таблиці спряженості), а також сучасне математичне

моделювання. Дана програма також використовується як альтернатива комерційним програмним середовищам аналізу даних рівня MatLab / Octave. З іншого боку, цілком природно, що основна обчислювальна потужність R найкраще проявляється при статистичному аналізі: від обчислення середніх величин до вейвлет-перетворень тимчасових рядів.

Додаткової популярності R дало створення системи зберігання і розповсюдження пакетів – CRAN (Comprehensive R Archive Network — http://cran.r-project.org) [14]. Статистичні алгоритми зазвичай виконуються у вигляді скриптів і зібрані у пакети (packages) R. Під час інсталяції разом з базовою програмою інсталюються й основні пакети, у яких реалізовано найбільш популярні методи статистичного аналізу. Частина цих пакетів автоматично завантажується під час запуску R. Інші пакети можна завантажити, використовуючи функцію library.

Переваги пакета R:

– пакет R є вільно поширюваним програмним забезпеченням (будь-хто може його безкоштовно завантажити з сайту http://www.r-project.org);
– є реалізації під операційні системи Microsoft Windows, Mac OS X, Linux;
– базова комплектація R займає небагато місця на диску і містить усі функції, необхідні для проведення статистичного аналізу;
– завжди можна додатково встановити допоміжні пакети;
– хороша графічна візуалізація подання даних та результатів їхнього аналізу;
– можливість самостійного написання необхідних функцій.

Робота з пакетом R

Після відкриття програми пакет R x64 3.5.2 з'являється її головна сторінка (рис. 1).

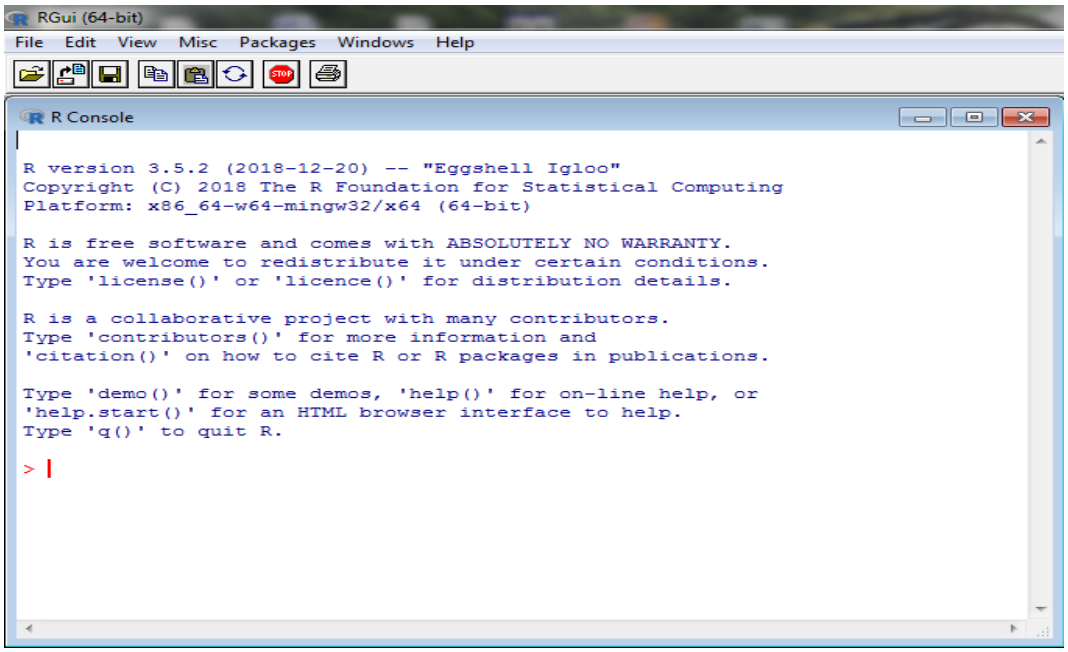


Рис. 1. Головна сторінка програми програми пакету R x64 3.5.2

У верхній частині вікна знаходиться головне меню, а нижче відкрито вікно «консолі R», в якій можна давати інструкції програмі та отримувати її відповіді. Синім кольором у цьому вікні виведено початкову інформацію про версію базової програми R. Червоний символ > є запрошенням користувачу вводити власні інструкції.

При роботі з R можна виконувати одразу багато інструкцій, що записані в окремому файлі. Найпростіший спосіб зробити – це завантажити такий файл, в якому-небудь текстовому редакторі, скопіювати, а потім вставити на консолі. При цьому, якщо інструкції у файлі розміщені у окремих рядках, розділових знаків між ними не потрібно. Інструкції, вміщені в одному рядку, розділяють символом «крапка з комою». Якщо довга інструкція не вміщується у одному рядку, її можна розбити на декілька рядів, причому, при переході до наступного рядка R автоматично виводить символ продовження +. R сам здогадується, що інструкція не закінчена за її синтаксисом. Тому деякі синтаксичні помилки (наприклад, забуті дужки) можуть сприйматись як незакінчені інструкції. У цьому випадку R присвоїть + на початку наступного рядка і перейде у режим очікування. Натиснувши Escape можна перейти у режим введення нової інструкції без продовження аналізу попередньої. Програми, що складаються з інструкцій R, називають скриптами (script). Вони мають стандартне розширення .r. У базовій програмі є можливість відкрити вікно редактора для створення нового скрипту, або завантажити файл зі скриптом, використовуючи пункти головного меню File->Newscript або File->Openscript. Виконати завантажений у вікні редактора скрипт повністю можна, використовуючи Edit->Runall.

Зберегти скрипт можна за допомогою команди File>Save.

Пакети в R

Однією з важливих переваг R є наявність для нього різноманітних розширень або пакетів, які реалізують найбільш популярні технології статистичної обробки [15]. Частина цих пакетів автоматично завантажується при запуску R.

Якщо потрібний пакет не було інстальовано на комп'ютері, його можна завантажити з інтернет-архіву, використовуючи пункти головного меню Packages->Installpackage(s). Спочатку програма пропонує вибрати інтернет-архів, з якого робиться інсталяція. Варіант 0-cloud, що пропонується за умовчанням, як правило, працює цілком задовільно. Після цього треба у списку вибрати необхідний пакет. Якщо цей пакет використовує інші, яких немає на комп'ютері, вони будуть інстальовані автоматично.

Після того, як пакети інстальовані, вони зберігаються на комп'ютері, але для роботи з ними під час сеансу їх необхідно підключати, використовуючи функцію library. Усі об'єкти, створені або завантажені під час сеансу роботи з R і не видалені спеціальною інструкцією, зберігаються у робочому просторі. Наприкінці сеансу R запитує, чи зберігати робочий простір на диску: *Save workspace image?* Якщо вибрати збереження, то цей робочий простір буде відновлено на початку наступного сеансу. Такою можливістю варто користуватись дуже обережно, оскільки «старі» об'єкти можуть спотворювати роботу R у новому сеансі. Зберігати робочий простір доцільно лише в тому випадку, коли є необхідність наступного разу продовжити роботу з того самого місця, на якому була закінчена робота попереднього разу.

Корисні сайти, списки посилань і документація по пакету R

– http://www.r-project.org/ — сайт проекту;
– http://cran.r-project.org/ — CRAN;
– https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/ — список посилань R-help;
– http://finzi.psych.upenn.edu/nmz.html — пошук в матеріалах по R;
– http://www.statmethods.net/index.html — хороший довідник ресурс;
– http://zoonek2.free.fr/UNIX/48_R/all.html — довідник по R;
– http://pj.freefaculty.org/R/Rtips.html — поради щодо використання R.

Результати чисельного моделювання біосенсора на гексагональній решітці у вигляді решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів.

З метою отримання результатів чисельного моделювання кіберфізичних біосенсорних системах на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням вводяться значення параметрів моделі біосенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. У комп'ютерній програмі «Комп'ютерне моделювання решітчастих зображень флуоресціюючих пікселів в кіберфізичній біосенсорній системі на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням» визначальними є параметри моделі, їх числові значення, а також представлення параметрів та їх числових значень в пакеті R, згідно з табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів моделі біосенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням

№ п/п	Назва параметра моделі	Числові значення параметрів	Представлення параметрів та їх числових значень в пакеті R
1	Ціле натуральне число, яке характеризує кількість імунопікселів в гексагональній решітці	$N = 4$	N <- 4#4#16
2	Константа народжуваності для популяції антигенів	$\beta = 2\min^{1}$	beta <- 2
3	Ймовірнісна швидкість нейтралізації антигенів антитілами	$\gamma = 2\frac{mL}{\min \mu g}$	gamma <- 2
4	Стала смертності антитіл	$\mu_f = 1\min^{1}$	mu_f <- 1
5	Щільність антигенів	$\eta = 0.8/\gamma$	etha <- 0.8/gamma #0.01184/gamma
6	Швидкість, з якою популяція антигенів прагне до деякої межі насичення	$\delta_\upsilon = 0.5\frac{mL}{\min \mu g}$	delta_v <- 0.5 #0.035 #0.7
7	Швидкість, з якою популяція антитіл прагне до деякої межі насичення	$\delta_f = 0.5\frac{mL}{\min \mu g}$	delta_f <- 0.5 #0.0175 #0.2
8	Постійна запізнення в часі, з якою настає імунна відповідь	$\tau = 0.05$, $\tau = 0.25$, $\tau = 0.287$	tau <- 0.05#0.25#0.287

Продовження табл. 1

№ п/п	Назва параметра моделі	Числові значення параметрів	Представлення параметрів та їх числових значень в пакеті R
9	Коефіцієнт дифузії	$D = 0.2\frac{nm^2}{\min}$	D <- 0.2
10	Відстань між пікселями	$\Delta = 0.3nm$	Delta <- 0.3
11	Стала дисбалансу	$n > 0$	n <- 0.9 #1.
12	Коефіцієнт пропорційності інтенсивності флуоресценції до кількості контактів між антигенами та антитілами	k_{fl}	k_{fl} <- 1
13	Порогове значення, що визначає перехід до стану флуоресценції в біопікселі	Θ_{fl}	fluorescence_intensity_threshold <- 1.5

Після введення відповідних значень параметрів моделі імуносенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням, згідно з табл. 1, представлення в пакеті R x64 3.5.2 отримаємо у вигляді рис. 2.

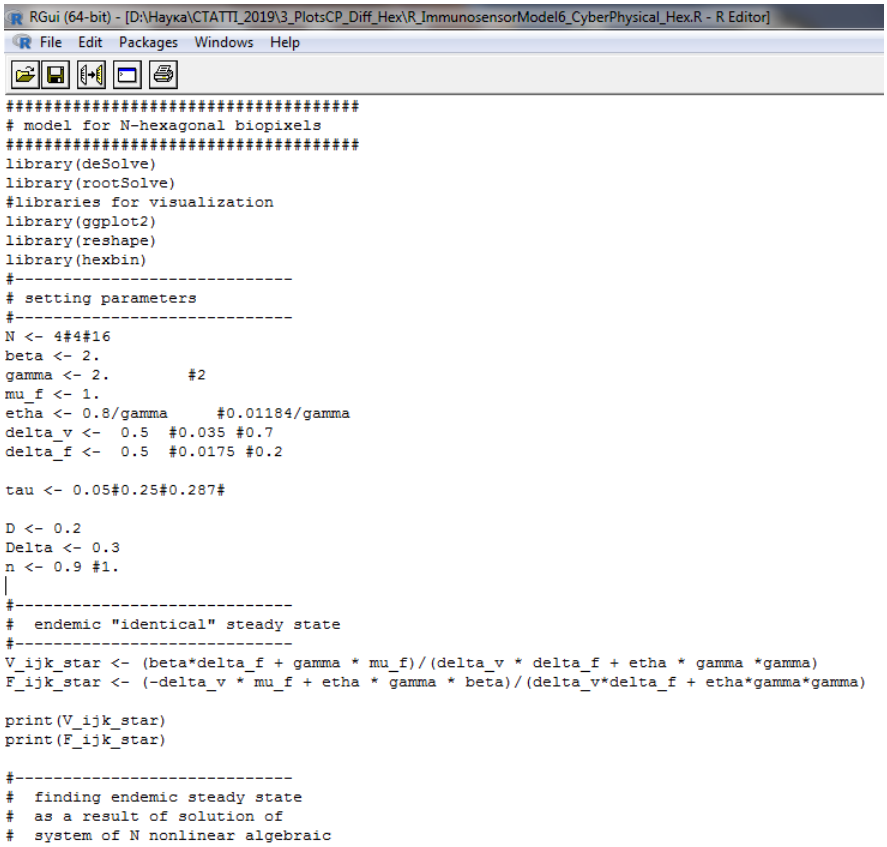


Рис. 2. Представлення в пакеті R x64 3.5.2 математичної моделі імуносенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням та відповідних параметрів згідно з табл. 1.

На рис. 2 також наведено результат введення моделі дискретної динамічної логіки імуносенсора на гексагональній решітці з використанням диференціальних рівнянь, яка має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j,k}(t)}{dt} &= (\beta - \gamma F_{i,j,k}(t-\tau)) - \delta_v V_{i,j,k}(t-\tau) V_{i,j,k}(t) + S\left\{V_{i,j,k}\right\} \\ \frac{dF_{i,j,k}(t)}{dt} &= (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j,k}(t) F_{i,j,k}(t)) F_{i,j,k}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Для математичного моделювання динамічної логіки імуносенсора використовується синтаксис у вигляді мови програмування гібридних програм. У імуносенсорі перший рівень гібридних програм є динамічною програмою, яка визначається наступною граматикою

$$\frac{dV_{i,j,k}(t)}{dt} = (\beta - \gamma F_{i,j,k}(t-\tau) - \delta_{\upsilon} V_{i,j,k}(t-\tau))V_{i,j,k}(t) + \hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\},$$
$$\frac{dF_{i,j,k}(t)}{dt} = (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j,k}(t))F_{i,j,k}(t) \,\&\, \Phi_t \qquad (2)$$

У формулі (2) Φ_t є еволюційним доменним обмеженням у вигляді формули логіки першого порядку

$$\Phi_t \overset{\text{def}}{\equiv} V^{\min} \le V_{i,j,k}(n) \le V^{\max}$$
$$\wedge\ F^{\min} \le F_{i,j,k}(n) \le F^{\max} \wedge\ i,j,k = \overline{N,N} \wedge\ t > 0, \qquad (3)$$
$$i + j + k = 0$$

В результаті зв'язування антигенів з антитілами в імунопікселі відбувається явище флуоресценції. Функціонування імунопікселя (i,j,k) визначається двома станами. А саме, S_{fl} є станом флуоресценції та $S_{non\,fl}$ є одним із нефлуоресцентних станів.

Інтенсивність флуоресценції пропорційна кількості контактів між антигенами та антитілами, тобто $k_{fl}V_{i,j,k}(t)F_{i,j,k}(t)$. Припускається, що піксель (i,j,k) знаходиться у стані флуоресценції, якщо

$$k_{fl}V_{i,j,k}(t)F_{i,j,k}(t) \ge \Theta_{fl}, \qquad (4)$$

У формулі (4) $\Theta_{fl} > 0$ є деяким пороговим значенням зв'язування, за якого відбувається явище флуоресценції.

Проаналізовано тривалу поведінку моделі (1) при $\tau = 0.05$, $\tau = 0.25$, $\tau = 0.287$ з набором значень параметрів, які представлені вище (рис. 3). Спостерігаємо якісні зміни поведінки імунопікселів та моделі в цілому.

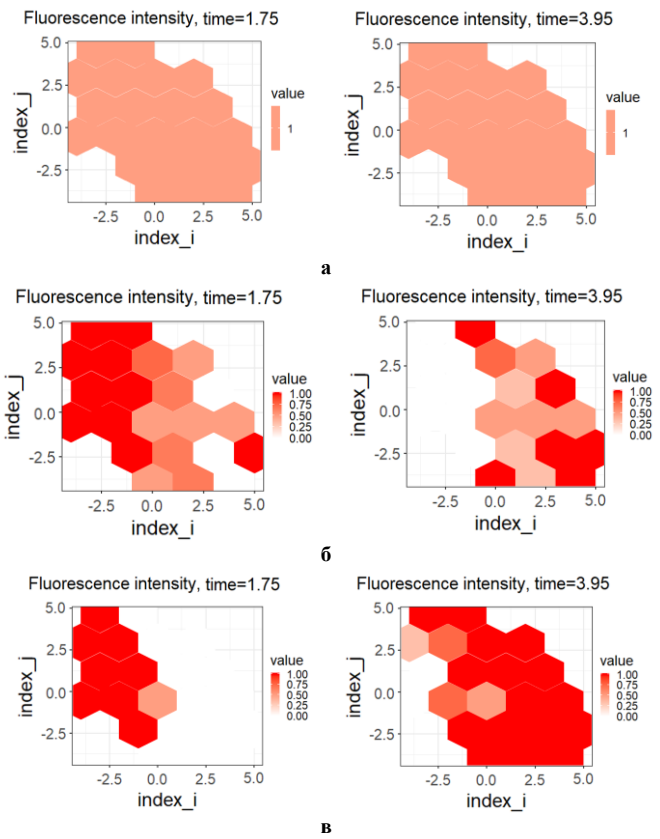


Рис. 3. Зображення флуоресценціюючих пікселів системи (1) при а – $\tau = 0.05$, **б –** $\tau = 0.25$, **в –** $\tau = 0.287$

Детальний опис математичної моделі біосенсора з використанням диференціальних рівнянь із запізненням представлено в роботах [16–20]. Дослідження стійкості моделі імуносенсора та кіберфізичної системи з використанням диференціальних рівнянь із запізненням в пакеті R наведено в роботах [21, 22].

Висновки. Описано пакет R, як середовище програмування для статистичного аналізу даних. Представлено фрагмент роботи з досліджуваним пакетом, наведені посилання на корисні сайти, списки посилань і документація по пакету R. У роботі проведено комп'ютерне моделювання контактів антигенів з

антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням за допомогою пакету R. Отримані результати мають визначальне значення під дослідженні стійкості моделі імуносенсора. При цьому враховується наявність колоній антигенів та антитіл, що локалізовані у пікселях, а також дифузію колоній антигенів між пікселями.

Література

1. Lee E. A. Cyber physical systems: Design challenges," Center for Hybrid and Embedded Software Systems. EECS University of California, Berkeley, CA 94720, USA, Tech. Rep. UCB/EECS-2008-8. Jan. 2008, p. 10. URL: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/ EECS-2008-8.pdf.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters. 2015. vol. 3. p. 18–23. ISSN: 2213-8463. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X.
3. K.-Kim D., Kumar P. R. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. Proceedings of the IEEE, no. Special Centennial Issue. 2012. vol. 100. p. 1287–1308. DOI: 10.1109/jproc.2012.2189792. URL: https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2189792.
4. Martsenyuk V.P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A.S. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks. Medical informatics and engineering. 2018. № 1(41). p. 13–19. DOI: https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.1.8887.
5. Karunakaran Ch., Pandiaraj M., Santharaman P. Chapter 4 Immunosensors Biosensors and Bioelectronics. New York: Elsevier Inc. p. 124.
6. Kaspar Binz H., Amstutz P., Plückthun A. Engineering novel binding proteins from nonimmunoglobulin domains. Natural Biotechnology. 2005. V. 23. I. 10. P. 1257–1268.
7. Renberg B., Nordin J., Merca A., Uhlén M., Feldwisch J. Affibody molecules in protein capture microarrays: evaluation of multidomain ligands and different detection formats. Journal of Proteome Resourses. 2007. V. 6. P. 171–179.
8. Miao Z., Levi J., Cheng Z. Protein scaffold–based molecular probes for cancer molecular imaging. Amino Acids. 2010. V. 1. P. 9.
9. Binz H.K. Engineered proteins as specific binding reagents. Current Opinion in Biotechnology. 2005. V. 16. P. 459–469.
10. Dillon P.P., Daly S.J., Manning B.M., O'Kennedy R. Immunoassay for the determination of morphine–3–glucuronide using a surface plasmon resonance-based biosensor. Biosensors and Bioelectronics. 2003. V. 18. P. 217–227.
11. Tang J., Huang Y., Zhang C., Liu H., Tang D. Amplified impedimetric immunosensor based on instant catalyst for sensitive determination of ochratoxin A. Biosensors and Bioelectronics. 2016. V. 86. P. 386–392.
12. Liu Y., Raymond R. L., Zenga X. Single Chain Fragment Variable Recombinant Antibody Functionalized Gold Nanoparticles for a Highly Sensitive Colorimetric Immunoassay. Biosensors and Bioelectronics. 2009. V. 24. I. 9. P. 2853–2857.
13. Jon Sáenz, Santos J. González-Rojí, Sheila Carreno-Madinabeitia, Gabriel Ibarra-Berastegi. Analysis of atmospheric thermodynamics using the R package aiRthermo, Computers & Geosciences, Volume 122, 2019, Pages 113–119, ISSN 0098-3004. URL: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.007.
14. Carla A.R.S. Fontoura, Gastone Castellani, José C.M. Mombach. The R implementation of the CRAN package PATHChange, a tool to study genetic pathway alterations in transcriptomic data, Computers in Biology and Medicine, Volume 78, 2016, Pages 76–80, ISSN 0010-4825. URL: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2016.09.010.
15. Daniel Adler, Duncan Murdoch, et al. rgl: 3D Visualization Using OpenGL. R package version 0.96.0. 2016. URL: https://CRAN.R-project.org/package=rgl.
16. Martsenyuk V., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay. Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations. 2018. 27. p. 1–31. ISSN: 1417-3875. Scopus, Web of Science. Impact Factor: 0.881. DOI: 10.14232/ejqtde.2018.1.27.
17. Марценюк В. П. Об использовании решетчастых дифференциальных уравнений с запаздыванием для моделирования иммуносенсора / И.Е. Андрущак, П.Н. Зинько, А.С. Сверстюк // Проблемы управления и информатики : международный научно-технический журнал. – 2018. – № 3. – С. 37–45.
18. Марценюк В. П. Подход к исследованию глобальной асимптотической устойчивости решетчатых дифференциальных уравнений с запаздыванием для моделирования иммуносенсоров / А.С. Сверстюк, И.Е. Андрущак // Проблемы управления и информатики : международный научно-технический журнал. – 2019. – № 1. – С. 62–74.
19. Martsenyuk V. Cyber-physical model of the immunosensor system at the hexagonal lattice with the use of differential equations of the population dynamics / A. Sverstiuk // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. – 2019. – № 1. – P. 75–83.

20. Сверстюк А.С. Моделювання кібер-фізичної імуносенсорної системи на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням / А.С. Сверстюк // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2019. – № 2. – С. 53–65.

21. Марценюк В.П. Комп'ютерна модель кібер-фізичної імуносенсорної системи з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням на гексагональній решітці / А.С. Сверстюк // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – № 2. – С. 131–139.

22. Марценюк В. П. Дослідження фазових площин моделі імуносенсора на прямокутній решітці з використанням диференціальних рівнянь із запізненням в пакеті R / В. П. Марценюк, А. С. Сверстюк, Н. В. Козодій, Є. О. Давиденко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2019. – № 2. – С. 37-47. – DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.172004

23. Марценюк В.П. Використання пакету R для комп'ютерного моделювання контактів антигенів з антитілами в кіберфізичних імуносенсорних системах на прямокутній решітці / А.С. Сверстюк, Н.В. Козодій, Ю.В. Кравчик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –2019. – № 4. – С. 97–105.

References

1. Lee E. A. Cyber physical systems: Design challenges," Center for Hybrid and Embedded Software Systems. EECS University of California, Berkeley, CA 94720, USA, Tech. Rep. UCB/EECS-2008-8. Jan. 2008, p. 10. URL: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/ EECS-2008-8.pdf.

2. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters. 2015. vol. 3. p. 18–23. ISSN: 2213-8463. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X.

3. K.-Kim D., Kumar P. R. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. Proceedings of the IEEE, no. Special Centennial Issue. 2012. vol. 100. p. 1287–1308. DOI: 10.1109/jproc.2012.2189792. URL: https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2189792.

4. Martsenyuk V.P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A.S. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks. Medical informatics and engineering. 2018. № 1(41). p. 13–19. DOI: https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.1.8887.

5. Karunakaran Ch., Pandiaraj M., Santharaman P. Chapter 4 Immunosensors Biosensors and Bioelectronics. New York: Elsevier Inc. p. 124.

6. Kaspar Binz H., Amstutz P., Plückthun A. Engineering novel binding proteins from nonimmunoglobulin domains. Natural Biotechnology. 2005. V. 23. I. 10. P. 1257–1268.

7. Renberg B., Nordin J., Merca A., Uhlén M., Feldwisch J. Affibody molecules in protein capture microarrays: evaluation of multidomain ligands and different detection formats. Journal of Proteome Resourses. 2007. V. 6. P. 171–179.

8. Miao Z., Levi J., Cheng Z. Protein scaffold–based molecular probes for cancer molecular imaging. Amino Acids. 2010. V. 1. P. 9.

9. Binz H.K. Engineered proteins as specific binding reagents. Current Opinion in Biotechnology. 2005. V. 16. P. 459–469.

10. Dillon P.P., Daly S.J., Manning B.M., O'Kennedy R. Immunoassay for the determination of morphine–3–glucuronide using a surface plasmon resonance-based biosensor. Biosensors and Bioelectronics. 2003. V. 18. P. 217–227.

11. Tang J., Huang Y., Zhang C., Liu H., Tang D. Amplified impedimetric immunosensor based on instant catalyst for sensitive determination of ochratoxin A. Biosensors and Bioelectronics. 2016. V. 86. P. 386–392.

12. Liu Y., Raymond R. L., Zenga X. Single Chain Fragment Variable Recombinant Antibody Functionalized Gold Nanoparticles for a Highly Sensitive Colorimetric Immunoassay. Biosensors and Bioelectronics. 2009. V. 24. I. 9. P. 2853–2857.

13. Jon Sáenz, Santos J. González-Rojí, Sheila Carreno-Madinabeitia, Gabriel Ibarra-Berastegi. Analysis of atmospheric thermodynamics using the R package aiRthermo, Computers & Geosciences, Volume 122, 2019, Pages 113–119, ISSN 0098-3004. URL: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.007.

14. Carla A.R.S. Fontoura, Gastone Castellani, José C.M. Mombach. The R implementation of the CRAN package PATHChange, a tool to study genetic pathway alterations in transcriptomic data, Computers in Biology and Medicine, Volume 78, 2016, Pages 76–80, ISSN 0010-4825. URL: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2016.09.010.

15. Daniel Adler, Duncan Murdoch, et al. rgl: 3D Visualization Using OpenGL. R package version 0.96.0. 2016. URL: https://CRAN.R-project.org/package=rgl.

16. Martsenyuk V., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay. Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations. 2018. 27. p. 1–31. ISSN: 1417-3875. Scopus, Web of Science. Impact Factor: 0.881. DOI: 10.14232/ejqtde.2018.1.27.

17. Marcenyuk V. P. Ob ispolzovanii reshetchastyh differencialnyh uravnenij s zapazdyvaniem dlya modelirovaniya immunosensora / I.E. Andrushak, P.N. Zinko, A.S. Sverstyuk // Problemy upravleniya i informatiki : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2018. – № 3. – S. 37–45.

18. Marcenyuk V. P. Podhod k issledovaniyu globalnoj asimptoticheskoj ustojchivosti reshetchatyh differencialnyh uravnenij s zapazdyvaniem dlya modelirovaniya immunosensorov / A.S. Sverstyuk, I.E. Andrushak // Problemy upravleniya i informatiki : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2019. – № 1. – S. 62–74.

19. Martsenyuk V. Cyber-physical model of the immunosensor system at the hexagonal lattice with the use of differential equations of the population dynamics / A. Sverstiuk // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. – 2019. – № 1. – R. 75–83.

20. Sverstiuk A.S. Modeliuvannia kiber-fizychnoi imunosensornoi systemy na priamokutnii reshittsi z vykorystanniam reshitchastykh dyferentsialnykh rivnian iz zapiznenniam / A.S. Sverstiuk // Sensorna elektronika ta mikrosystemni tekhnolohii. – 2019. – № 2. – S. 53–65.

21. Martseniuk V.P. Kompiuterna model kiber-fizychnoi imunosensornoi systemy z vykorystanniam reshitchastykh dyferentsialnykh rivnian iz zapiznenniam na heksahonalnii reshittsi / A.S. Sverstiuk // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2019. – № 2. – S. 131–139.

22. Martseniuk V. P. Doslidzhennia fazovykh ploshchyn modeli imunosensora na priamokutnii reshittsi z vykorystanniam dyferentsialnykh rivnian iz zapiznenniam v paketi R / V. P. Martseniuk, A. S. Sverstiuk, N. V. Kozodii, Ye. O. Davydenko // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. – 2019. – № 2. – S. 37-47. – DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.172004

23. Martseniuk V.P. Vykorystannia paketu R dlia kompiuternoho modeliuvannia kontaktiv antyheniv z antytilamy v kiberfizychnykh imunosensornykh systemakh na priamokutnii reshittsi / A.S. Sverstiuk, N.V. Kozodii, Yu.V. Kravchyk // Herald of Khmelnytskyi National University. –2019. – № 4. – S. 97–105.

Рецензія/Peer review : 19.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Лупенко С.А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-92-97
УДК 004.93

Г.М. НОВІЦЬКИЙ, С.М. ЗЛЕПКО, Л.Г. КОВАЛЬ, В.О. ГОМОЛІНСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ РИСУНКА ВЕН ДОЛОНІ ЗА КЛЮЧОВИМИ ТОЧКАМИ

В роботі здійснено порівняльний аналіз кількох методів ідентифікації людини за малюнком вен долоні і обрано метод із найкращими характеристиками. Проведено аналіз критичних точок венозного малюнка (мінуцій). Для оптимального зняття даних впроваджено нову методику сканування руки із використанням фіксаторів, що дозволяє до мінімуму скоротити зсув малюнка вен досліджуваної особи і полегшує його порівняння із шаблонним. Для скелетизації бінарного зображення обрано метод шаблонів, який дозволяє швидше обробити дані й отримати матрицю даних – координати мінуцій та їх тип.

Ключові слова: венозний малюнок , бінаризація, скелетизація зображення, мінуції.

H.M. NOVITSKII, S.M. ZLEPKO, L.H. KOVAL, V.O. HOMOLINSKYY
Vinnytsia National Technical University

THE RECOGNITION METHOD OF THE PALM VEIN PATTERNS BY THE KEY POINTS

In this work was implemented the comparative analysis of several methods of identification of the person by the palm vein patterns and the method with the best characteristics was selected. The analysis of the critical points of the venous pattern (minutiae) was implemented. For optimal data maintenance, a new method of the palm scanning with the usage of retainers is introduced, which minimizes the displacement of the vein patterns of the investigated person and makes it easier to compare with the template pattern. To skeletonize a binary image, a template method is selected that allows you to process the data faster and retrieve the data matrix with the coordinates of the minutiae and their types.

Keywords: venous drawing, binarization, skeletonization of the image, minutiae.

Вступ

Біометрична ідентифікація у розрізі зі зростаючими вимогами до безпеки доступу до певних ресурсів, інформації та матеріальних об’єктів все частіше використовується для ідентифікації особистості за окремими специфічними біометричними ознаками (ідентифікаторами), які є властивими конкретній особі. Найбільш поширеними методами біометричної ідентифікації особистості є сканування райдужної оболонки ока і відбитків пальців, які є основними у 2/3 від усіх систем ідентифікації.

Біометрична ідентифікація за малюнком вен руки – це відносно нова технологія у сфері біометрії, яка базується на інфрачервоному скануванні вен із подальшим цифровим обробленням. Ця технологія була розроблена для використання в системі охорони здоров’я, щоб допомогти лікарям знайти у пацієнтів вени для ін’єкційних маніпуляцій. Але враховуючи те, що структура вен у кожної людини індивідуальна, ця технологія викликала інтерес фахівців з ідентифікації, як більш надійна відносно технології ідентифікації за відбитком пальця, оскільки відтворити модель кровоносної системи неможливо [1].

Малюнок вен зчитується із зовнішнього боку долоні або кисті руки за допомогою інфрачервоної камери і дозволяє отримати достатньо чітке зображення кровоносних судин, таке, що навіть відносно невеликі порізи чи бруд на поверхні шкіри не перешкоджають успішній реєстрації особи. Поглинаючи випромінювання, відновлений гемоглобін переносить кисень венами і скорочує ступінь відбиття та відображення малюнка вени у вигляді чорного унікального візерунка. Далі отримане зображення обробляється, і залежно від розташування вен на руці формується цифрова згортка [2].

Переваги методу:

1) висока достовірність отриманих результатів;

2) відсутність необхідності прямого контакту з пристроєм, що здійснює сканування;

3) висока ступінь захищеності – рисунок неможливо отримати від людини «на вулиці», а у випадку використання муляжу кисті малюнок вен не буде зчитаний інфрачервоною камерою;

Недоліки методу:

1) недопустиме засвічення сканера сонячними променями і променями галогенних ламп;

2) вплив деяких захворювань, наприклад артриту, на прийняття рішення [1; 3].

Експериментальна частина

Після аналізу існуючих теоретичних та експериментальних даних виявлено, що для підвищення точності методу слід використовувати пристрій сканування із системою, що запобігає засвічення області сканування видимим світлом чи іншим джерелом, що може спотворити дані для ідентифікації. За рекомендацією виробників сканерів рисунка судин, мінімальне значення контрасту зображення малюнка вен становитиме не менше 0,125, що сприяє якісній обробці і аналізу зображення, а отже, підвищується точність біометричної ідентифікації.

На зображенні венозного малюнку долоні присутні наступні три області: область закінчення судини, область роздвоєння (розгалуження на дві частини), область вигину судини (табл. 1).

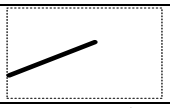
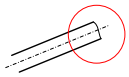
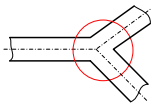
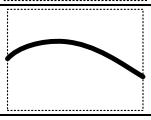
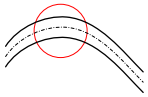
Закінченням називається область рисунка, в околі якої судина переривається через вихід судини з реєстрованого фрагменту тканин.

Роздвоєнням називається область, в околі якої судина розділяється на дві судини, або в околі якої дві судини сполучаються в одну.

Вигином називається область, в околі якої кривизна судини перевищує граничне значення. Під час ідентифікації дані ключові точки використовуються рідко [4].

Таблиця 1

Особливі області зображень рисунка вен долоні

№	Зображення особливої області	Схематичне подання	Тип особливої області
1			Закінчення
2			Роздвоєння
3			Вигин

В околі особливих областей локалізуються відповідні їм ключові точки. Плоска проекція венозного малюнка однозначно визначається взаємним розміщенням і типом ключових точок в околі особливих областей.

Структура венозного малюнка представляє локалізовану матрицю координат ключових точок і зв'язків між ними, і може бути описана, наприклад, у вигляді неповного плоского графу. Тоді вузлами графу є елементи множини *P(A)*, а форма ребер графа може бути апроксимована певним поліномом, якщо це необхідно.

Для повного подання структури у вигляді графу вводиться матриця суміжності *M*, яка відображає зв'язки між вузлами графу:

$$M_{P_i P_j} = \begin{cases} 0, & \mu(p_i, p_j) = 0 \\ \omega_{P_i P_j}, & \mu(p_i, p_j) \neq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де $\mu(p_i, p_j)$ – міра зв'язку між точками графу p_i і p_j, $\mu(p_i, p_j)$ = 0, якщо $i = j$ або p_i і p_j несуміжні; ω_{P_i,P_j} – міра, яка характеризує довжину ділянки венозного малюнка (вага ребер графу) [5].

Таким чином, комплекс ідентифікаційних характеристик венозного малюнка представляє собою набір ключових точок певного типу, який описується матрицею координат і матрицею суміжності.

Стосовно ж алгоритму ідентифікації, то він включає наступні етапи обробки зображень:

– отримання малюнка вен;

– розпізнавання малюнка вен, виділення ключових точок венозного малюнка;

– класифікація ключових точок, визначення типу ключових точок і формування матриці координат і матриці суміжності [6].

Принцип порівняння рисунків вен долоні за локальними ознаками складається з наступних етапів:

– поліпшення якості початкового зображення відбитка для збільшення чіткості меж венозних ліній; дана операція дозволяє максимально точно виділити на малюнку ключові точки (роздвоєння ліній та їх закінчення);

– бінаризація зображення відбитка – приведення до чорно-білого зображення (1 bit) пороговою обробкою;

– скелетизація зображення – стоншення ліній зображення відбитка, яке проводиться доти, доки лінії не будуть шириною 1 піксель;

– виділення мінуцій. Координати виявлених мінуцій та їх кути орієнтації записуються у вектор:

$$W(p) = [(x_1, y_1, t_1), (x_2, y_2, t_2), ..., (x_p, y_p, t_p)], \quad (2)$$

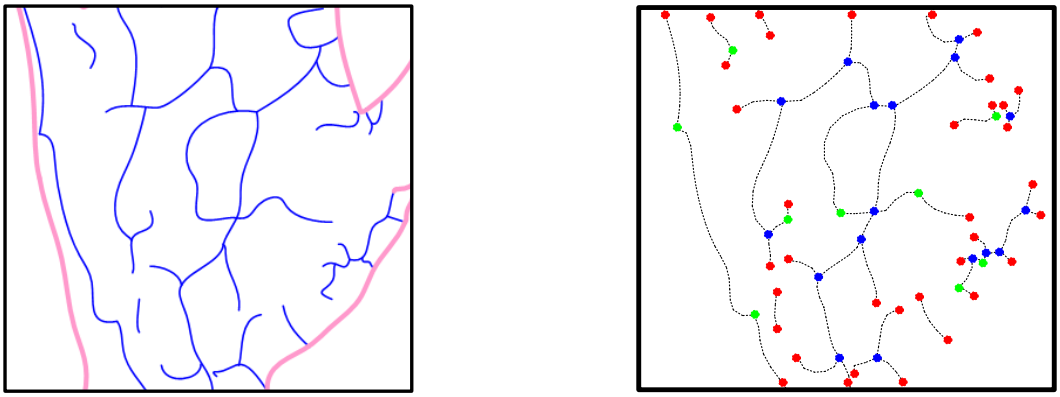
де *p* – кількість мінуцій [7]; під час реєстрації користувачів цей вектор вважається еталоном і записується в базу даних. Під час розпізнавання вектор визначає поточний відбиток (що цілком логічно);

зіставлення мінуцій. Два відбитки малюнка вен однієї долоні можуть відрізнятися один від одного поворотом (навіть незначним) і зсувом. Тому не можна прямо сказати, належить малюнок вен людині, чи не належить, на підставі простого їх порівняння (вектори еталону і поточного малюнка можуть відрізнятися довжиною, містити невідповідні мінуції тощо). Через це процес зіставлення повинен бути реалізований для кожної мінуції окремо [5].

Виділення ключових точок і визначення координат цих точок виконується у первинній системі координат. Для того, щоб уникнути численних перевірок на кути повороту та зсувів малюнка вен, застосовуємо метод переходу від декартових координат до полярних, перенісши центр координат у геометричний центр області сканування долоні. Це дозволить розпаралелити зіставлення відбитків, а також

знизити залежність імовірності розпізнавання відбитка вен від поворотів та зсувів. Швидкість розпізнавання відбитка збільшується завдяки порівнянню вагових коефіцієнтів, а не координат вершин та відстаней між ними. Базові відрізки формуються із внутрішніх точок розгалужень і закінчень венозного малюнка.

Під час порівняння відбитків на основі графів вихідне зображення відбитка перетворюється на зображення ключових точок із зазначенням їх типу (рис. 1 а,б).



а) б)

Рис. 1. Перетворення рисунка вен на зображення ключових точок

Ключові точки типу “закінчення” на рисунку позначені червоним кольором (їх 36 шт.), “роздвоєння” – синім кольором (17 шт.), “вигин” – зеленим (9 шт.). Як бачимо, найбільше ключових точок першого типу, а співвідношення між ними приблизно складає пропорцію 4 : 2 : 1.

Як бачимо, ключові точки типу “вигин” можна не використовувати під час зіставлення досліджуваного зразка із базовим, тому надалі будемо працювати лише з ключовими точками типів “закінчення” і “роздвоєння”, адже їх кількість становить більше 80% із загальної.

Скелетизація зображення проводилась за допомогою методу шаблонів, який по черзі переглядає всі точки бінарного зображення $f(x,y)\in\{0,1\}$, де значення 1 відповідає бінарній лінії візерунка, і аналізує околиці тільки забарвлених (інформативних) пікселів. Аналіз околиці представлений наступною формулою:

$$K=\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} f(x+j,y+i)\cdot h(i,j), \tag{3}$$

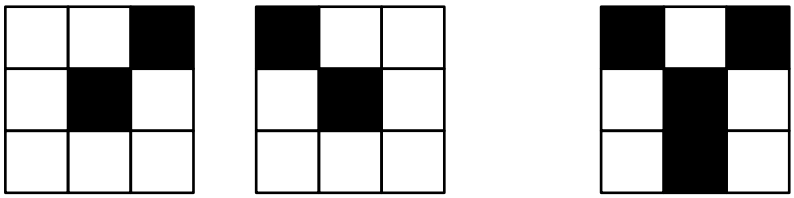
де K – величина оцінки околиці, використовувана як індекс; (x, y) – координати досліджуваного пікселя; $f(x, y)$ – значення пікселя на бінарному зображенні; $h(i, j)$ – маска, елементи якої задають вага точок, представлена у вигляді

$$h=\begin{pmatrix}128 & 64 & 32\\ 16 & 0 & 8\\ 4 & 2 & 1\end{pmatrix}, \tag{4}$$

Дана функція реалізується за допомогою операцій бітового зсуву під час обходу околиці, що забезпечує високу продуктивність розрахунків [6]

Індекс K – число в інтервалі від 0 до 255 включно. Воно розглядається алгоритмом як індекс гнізда в таблиці правил, заздалегідь заданої в процесі проектування.

Таблиця є закодованим набором правил і операцій з обробки околиці. Фактично вона організовує зв’язок між конкретним шаблоном і дією, яку необхідно зробити з околицею досліджуваної точки під час обчислення відповідного індексу K, який визначає номер елемента у таблиці. Кожний елемент таблиці містить код операції, нульовий код відповідає відсутності операції.



а) б)

Рис. 2. Виділення і визначення типу мінуцій: а) закінчення; б) роздвоєння

Зображення, отримане після скелетизації, розбивається на блоки 3×3 пікселі. Після цього підраховується кількість чорних (ненульових) пікселів, що знаходяться навколо центру. Піксель у центрі вважається мінуцією, якщо він сам ненульовий, і сусідніх ненульових пікселів один (мінуція “закінчення”)

або три (мінуція “роздвоєння”), – рис. 2 [6].

Коли знайдено усі мінуції і визначено їх тип, вводимо на зображенні декартову систему координат, взявши за початок координат лівий нижній кут, тоді вісь абсцис буде спрямована горизонтально зліва праворуч, а вісь ординат – вертикально знизу вгору (рис. 3).

Далі формуємо список мінуцій у вигляді таблиці, де для кожної із пронумерованих мінуцій будуть вказані її координати та тип, наприклад: 1 – закінчення, 2 – роздвоєння.

Для підвищення швидкості порівняння досліджуваного зразка з рисунком вен із тими, що зберігаються в пам’яті, використаємо видозміну методики, описаної у [7], що передбачає перехід від декартової системи координат до полярної. За новий початок координат вибираємо геометричний центр області з малюнком вен.

Оскільки величина малюнка розмірами 100×100 мм у пікселях становить 591×591, то центр O матиме декартові координати O(296; 296).

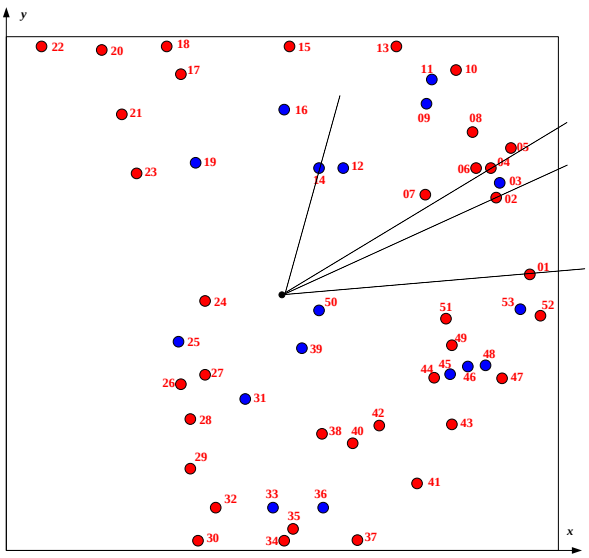


Рис. 3. Подання зображення рисунка вен у вигляді мінуцій

Обертаючи проти годинникової стрілки радіус-вектор з центру первинної системи координат (див. рис. 3), послідовно сполучаємо відрізками прямих ключові точки, які нам зустрічаються. Перехід від декартових координат до полярних здійснюється за формулами:

$$\rho_i^{\,2} = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2,$$
$$\varphi_i = arctg\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right) \tag{5}$$

Квадрат, а не корінь квадратний, для обчислення значення довжини радіус-вектора для певної мінуції береться для прискорення обчислень, оскільки нас не цікавлять точні значення відстаней між мінуціями, а лише порядок зміни їх типу.

Якщо кілька точок зустрічаються в одному напрямку радіус-вектора, то попередня точка сполучається з ближчою до центру (менше значення ρ^2), а та – з дальшою від центру, на одному з нею радіус-векторі. Таким чином формується замкнений контур базових відрізків, які утворюють ламану з вершинами у ключових точках. Ми отримали орієнтований граф, або орграф. Кількість вершин і кількість ребер у орграфі співпадають ($n = m = 53$), бо вершини сполучені послідовно. Усі вершини орграфу мають степінь 2, бо кожній вершині графу інцидентні два ребра. [8]

Для отриманого орграфу можна записати матрицю інцидентності A, матрицю суміжності вершин B і матрицю вагових співвідношень C [9].

Матриця інцидентності A показує, яке ребро (правильніше буде говорити про вектор, або дугу) в даній вершині закінчується (індекс “–1”), а яке починається (індекс “1”) [10].

Матриця суміжності вершин B показує, які з вершин орграфу сполучені дугами, а які – ні. Оскільки прохід вершин орграфу дає простий ланцюг, то очевидно, що кожна вершина сполучена дугами тільки із попередньою і наступною. Тому список суміжності для даного орграфу має вигляд [11]:

G:

v_1: v_2
v_2: v_3
v_3: v_4
…
v_{52}: v_{53}
v_{53}: v_1.

Ваги ребер для даного орграфу визначаються дуже просто: якщо відрізок сполучав дві мінуції типу “закінчення”, то вага ребра становить 1; якщо мінуції мають різний тип, ребру присвоюємо вагу 2; якщо сполучалися дві ключові точки типу “роздвоєння” – вага 3 (рис. 4).

Після формування матриці вагових співвідношень C залишається перевірити, чи співпадає кількість мінуцій у досліджуваному зразку і шаблоні ($m_C = m_D$), оскільки у ізоморфних графів кількість вершин тотожна. Після цього здійснити операцію віднімання двох матриць: C (досліджуваний зразок) і D (шаблон, із яким порівнюється даний відбиток малюнка вен):

$$R(C,D) = (c_{11} - d_{11})^2 + (c_{12} - d_{12})^2 + \ldots + (c_{n(n-1)} - d_{n(n-1)})^2 + (c_{nn} - d_{nn})^2. \tag{6}$$

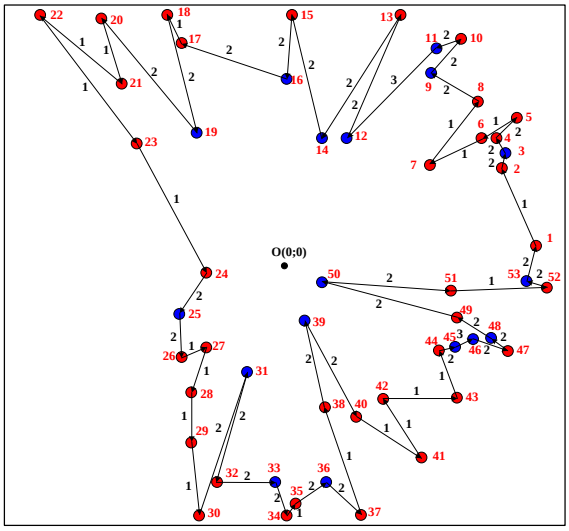


Рис. 4. Орієнтований граф із зазначенням ваг його ребер

Чим меншим буде отриманий результат (близьким до нуля), тим більш схожими будуть орграфи, а отже, і малюнок вен долоні буде більш тотожним шаблонному [11].

Паралельно із попереднім формуємо другий орграф, вершинами якого є мінуції типу “роздвоєння”, сполучені послідовно ребрами (рис. 5). Для цього зі списку мінуцій вибираємо тільки один їх тип, а мінуції типу “закінчення” ігноруємо. В результаті отримаємо орграф із меншою кількістю вершин і ребер, тому доцільно буде застосовувати для співставлення його із шаблонним координатний метод, проте модифікований для спрощення обрахунків.

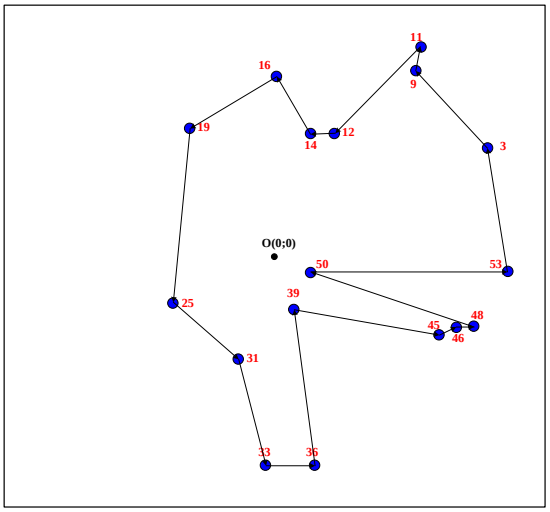


Рис. 5. Орієнтований граф, вершинами якого є мінуції типу “роздвоєння”

Як правило, перевіряючи графи на ізоморфізм, співставляють координати їх вершин (пересвідчившись спершу, що кількість вершин та ребер у двох орграфах співпадає) або довжину ребер між ними. Для цього необхідно обчислювати по черзі як місце вершин на площині, так і геометрію ребер. Інший спосіб ідентифікації графів – обхід вздовж усього ланцюга, обчислюючи довжину маршруту.

Проте ми скористаємося іншим способом перевірки ізоморфізму орграфів, а саме наступним. Оскільки під час переходу від декартових координат до полярних ми обчислили довжину радіус-вектора для кожної з вершин, то доцільно просто скласти матрицю цих довжин для досліджуваного орграфа і шаблонного, а потім здійснити операцію віднімання двох матриць (за формулою 6). Якщо ми отримаємо в результаті значення, нижче за порогове, це означатиме, що ідентифікація пройшла успішно.

Два дані методи можна використовувати як окремо, так і в комплексі: застосувавши обидва методи співставлення двох орграфів, ми отримаємо ще точніший результат, проте витратимо більше часу на перевірку [10].

Висновки

У роботі здійснено порівняльний аналіз кількох методів ідентифікації людини за малюнком вен долоні і обрано метод із найкращими характеристиками.

Проведено аналіз критичних точок венозного малюнка (мінуцій), вирішено використовувати для ідентифікації тільки мінуції типів “роздвоєння” і “закінчення”. Для оптимального зняття даних впроваджено

нову методику сканування руки із використанням фіксаторів, що дозволяє до мінімуму скоротити зсув малюнка вен досліджуваної особи і полегшує його порівняння із шаблонним.

Для скелетизації бінарного зображення обрано метод шаблонів, який дозволяє швидше обробити дані й отримати матрицю даних, – координати мінуцій та їх тип.

Використання графів дозволило уникнути обчислення відстаней між мінуціями та знаходження їх взаємного розташування. Використано ваги ребер у графі, які залежать від того, які саме типи точок сполучає дане ребро. Дана методика раніше не використовувалася під час ідентифікації взагалі.

Для спрощеної ідентифікації ми використовуємо тільки мінуції типу "роздвоєння" та значення довжини радіус-вектора для кожної з них.

В обох методах ідентифікації порівняння двох графів зводиться виключно до віднімання матриць і порівняння результату із пороговим.

Література

1. Царьов Р.Ю. Біометричні технології : навч. посіб. [для вищих навчальних закладів] / Царьов Р.Ю., Лемеха Т.М. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2016. –140 с.
2. Тихонов И.А. Информативные параметры биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла / И.А. Тихонов // Безопасность информационных технологий. – 2011. – № 4. – С. 61–68.
3. Обзор существующих методов биометрической идентификации. URL: http://www.sec4all.net/modules/myarticles/article.php?storyid= 1265.
4. Starink J., Backer E. Finding point correspondences using simulated annealing". Pattern Recognition. Vol. 28, № 2, 1995, p. 231–240.
5. Клубков И.М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения / И.М. Клубков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1, № 1 (7). – С. 126–133.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Pfalz J.L., Rosenfeld A. Computer Representation of Planar Regions by their Skeletons. Communications of the Association for Computing Machinery, 1967, Vol. 10, № 2, p. 119–125.
8. Огнев А. В. Центрирование отпечатков пальцев при инвариантном распознавании на основе метрики Хаусдорфа / А. В. Огнев, А. П. Типикин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации : сб. мат. VIII Междунар. конф. "Распознавание – 2008". Ч. 2. – Курск : КурскГТУ, 2008. – С. 34–35.
9. Трохимчук Р. М. Теорія графів : навчальний посібник для студентів факультету кібернетики / Р. М. Трохимчук. – К. : Редакційно-видавничий центр "Київський університет", 1998. – 43 с.
10. Карнаух Т. О. Теорія графів у задачах / Карнаух Т. О., Ставровський А. Б. – К., Наука. – С. 23–44.
11. Домнин Л. Н. Элементы теории графов : учеб. Пособие / Домнин Л. Н. – Пенза : Изд-во Пенз. Гос. ун-та, 2007. – С. 13–31.

References

1. Tsarov R.Iu. Biometrychni tekhnolohii : navch. posib. [dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv] / Tsarov R.Iu., Lemekha T.M. – Odesa : ONAZ im. O.S. Popova, 2016. –140 s.
2. Tihonov I.A. Informativnye parametry biometricheskoj autentifikacii polzovatelej informacionnyh sistem po infrakrasnomu izobrazheniyu sosudistogo rusla / I.A. Tihonov // Bezopasnost informacionnyh tehnologij. – 2011. – № 4. – S. 61–68.
3. Obzor sushestvuyushih metodov biometricheskoj identifikacii. URL: http://www.sec4all.net/modules/myarticles/article.php?storyid= 1265.
4. Starink J., Backer E. Finding point correspondences using simulated annealing". Pattern Recognition. Vol. 28, № 2, 1995, p. 231–240.
5. Klubkov I.M. Primenenie volnovogo algoritma dlya nahozhdeniya skeleta rastrovogo izobrazheniya / I.M. Klubkov // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2001. – T. 1, № 1 (7). – S. 126–133.
6. Gonsales R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / Gonsales R., Vuds R. – M. : Tehnosfera, 2005. – 1072 s.
7. Pfalz J.L., Rosenfeld A. Computer Representation of Planar Regions by their Skeletons. Communications of the Association for Computing Machinery, 1967, Vol. 10, № 2, p. 119–125.
8. Ognev A. V. Centrirovanie otpechatkov palcev pri invariantnom raspoznavanii na osnove metriki Hausdorfa / A. V. Ognev, A. P. Tipikin // Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvolnoj informacii : sb. mat. VIII Mezhdunar. konf. "Raspoznavanie – 2008". Ch. 2. – Kursk : KurskGTU, 2008. – S. 34–35.
9. Trokhymchuk R. M. Teoriia hrafiv : navchalnyi posibnyk dlia studentiv fakultetu kibernetyky / R. M. Trokhymchuk. – K. : Redaktsiino-vydavnychyi tsentr "Kyivskyi universytet", 1998. – 43 s.
10. Karnaukh T. O. Teoriia hrafiv u zadachakh / Karnaukh T. O., Stavrovskyi A. B. – K., Nauka. – S. 23–44.
11. Domnin L. N. Elementy teorii grafov : ucheb. Posobie / Domnin L. N. – Penza : Izd-vo Penz. Gos. un-ta, 2007. – S. 13–31.

Рецензія/Peer review : 13.11.2019 р. Надрукована/Printed : 12.01.2020
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-98-104
УДК 004.67

В.В. ЯЦКІВ, С.В. КУЛИНА
Тернопільський національний економічний університет

МЕТОД НАДІЙНОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ НАДЛИШКОВОЇ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

В роботі запропоновано метод надійного зберігання даних на основі коригуючих кодів системи залишкових класів. Важливою характеристикою систем зберігання даних є висока швидкодія запису та зчитування інформації з накопичувачів. Враховуючи, що система зберігання базується на коригуючих кодах, необхідно отримати підвищену швидкодію процесів кодування та декодування даних. Перевагою запропонованого рішення є менша надлишковість для відновлення даних, порівняно з технологією RAID та інших систем, що базуються на коригуючих кодах.

Ключові слова: система залишкових класів, коригуючі коди.

V.V. YATSKIV, S.V. KULYNA
Ternopil National Economic University

THE METHOD OF RELIABLE DATA STORAGE BASED ON REDUNDANT RESIDUE NUMBER SYSTEM

The main advantages and disadvantages of existing real-time data storage methods used to improve the reliability of storage systems are discussed. The main purpose of the study is the storage system reliability improvement by using coding methods based on redundant residue number system. The proposed method of secure data storage is based on the corrective codes of the residue number system. The essence of this method is that the array of obtained data is divided into fragments which are used to calculate the residuals by the selected system of relatively prime modules. The resulting residuals are stored on separate disks, which can be placed on one device or connected remotely. Considering that during encoding an extended module system is used, in case of disk distortion or failure, the redundant residue number system allows to recover the data fragment using only one validation module, if it is known which data block has been lost. The important characteristic of storage systems is the high speed of data writing / reading. Due to the fact that the storage system will use corrective codes, it is necessary to ensure a high speed of data encoding / decoding processes. The advantage of the proposed solution is that there is less redundancy in data recovery compared to RAID technology and systems that use other correction codes. The authors conducted experimental studies on the dependence of the required time for data packet processing on the selected module systems. According to the obtained results, the transition to a system with more modules allows to increase the speed by 13-15% compared to the previous one. Also the bit rate increasing allows to increase the encoding and decoding speed by 1.81-2.11 times. The developed system provides high reliability of data storage through the possibility of data recovery in case of some disks failure, and also high data security due to the distributed storage.

Keywords: residue number system, correction codes, storage, reliability.

Вступ

Останнім часом все більшого попиту на світовому ринку досягають системи надійного зберігання даних. В даний час вони використовуються як під час побудови баз даних, так і для сховищ даних, для корпоративних рішень окремих компаній і для організації мережних та хмарних сховищ даних. З цього зрозуміло, що розробка та впровадження методів підвищення ефективності вказаного класу систем дозволить значно розширити їх область застосування і відповідно збільшить ринок таких систем.

Згідно з світовою практикою більшість організацій використовують методи розподіленого (віддаленого) зберігання та резервного копіювання, а також методи зберігання даних в режимі реального часу для ліквідації наслідків втрати інформації.

Для зберігання даних в режимі реального часу використовують наступні типи систем [1]:

1) пряме сховище (direct-attached storage, DAS);
2) мережний пристрій зберігання даних (network attached storage, NAS);
3) мережа зберігання даних (storage area network, SAN);
4) хмарне сховище (Cloud storage);
5) резервний масив незалежних дисків (Redundant array of independent disks, RAID).

DAS (Direct-attached storage – система зберігання даних із прямим підключенням) – це сховище, яке складається тільки з накопичувача даних (жорсткий диск або USB-накопичувач), який безпосередньо під'єднаний до комп'ютера чи робочої станції через контролер шини даних. Іншими словами, DAS не є частиною мережі зберігання даних.

Основними перевагами DAS є простота та низька вартість встановлення. Використання мережевих систем зберігання вимагає більшого планування, а також придбання та розгортання мережевого обладнання, такого як маршрутизатори та комутатори, на додаток до відповідних кабелів і з'єднань.

NAS (Network attached storage – мережева система зберігання даних) – це пристрій, підключений до мережі, який дозволяє авторизованим користувачам зберігати та отримувати дані з централізованого сховища.

Перевага NAS полягає в тому, що він спрощує обмін файлами між декількома користувачами, потенційно забезпечуючи більш високу продуктивність, ніж традиційний файловий сервер.

SAN (Storage area network – мережа зберігання даних) – це високошвидкісна мережа пристроїв зберігання даних, які також з'єднують ці пристрої зберігання даних з серверами. Вона надає систему

блочного копіювання даних у сховище, до якої можуть звертатися програми, запущені на будь-яких мережевих серверах. Завдяки високошвидкісним з'єднанням, SAN часто забезпечує кращу продуктивність, ніж DAS. Крім того, оскільки SAN, як правило, пропонує кілька підключень до серверів центру обробки даних, що також підвищує доступність даних. Крім того, відокремлення сховища від серверів звільняє обчислювальні ресурси на серверах для інших завдань, не пов'язаних зі зберіганням інформації.

Хмарне сховище (Cloud storage) – це вид віддаленого сховища, під час застосування якого використовується простір на накопичувачах в дата-центрі (Google Drive, iCloud і Dropbox та ін.).

Існує безліч переваг використання хмарних сховищ, найбільш значимою є доступність даних. Доступ до інформації, що зберігаються в хмарі, можна отримати в будь-який час з будь-якого місця, якщо у вас є доступ до Інтернету. Іншою перевагою є те, що хмарне зберігання надає організаціям можливість здійснювати віддалене резервне копіювання даних, що знижує витрати, пов'язані з аварійним відновленням.

На жаль, найбільшим недоліком для хмарних сховищ є те, що користувачі обмежені пропускною здатністю. Якщо підключення до Інтернету повільне чи нестабільне, можливо, виникнуть проблеми з доступом до файлів або їх спільного використання.

RAID (англ. Redundant Array of Independent Disks) – технологія віртуального сховища даних, яка об'єднує декілька дисків у логічний том з надлишковістю даних, з метою забезпечення відмовостійкості або поліпшити загальну продуктивність накопичувачів.

RAID дозволяє зберігати однакові дані надлишково (в декількох кроках) збалансованим способом, щоб поліпшити загальну продуктивність. Диски RAID часто використовуються на серверах, але, як правило, не потрібні для персональних комп'ютерів. Набором пристроїв, з яких складається система зберігання, керує особливий контролер масиву (RAID-контролер). Він забезпечує зв'язок між дисками, розміщення даних та дозволяє відобразити увесь масив, як логічний пристрій зберігання. За рахунок виконання операцій читання та запису на декількох дисках одночасно, масив забезпечує вищу швидкість обміну в порівнянні з одним великим диском.

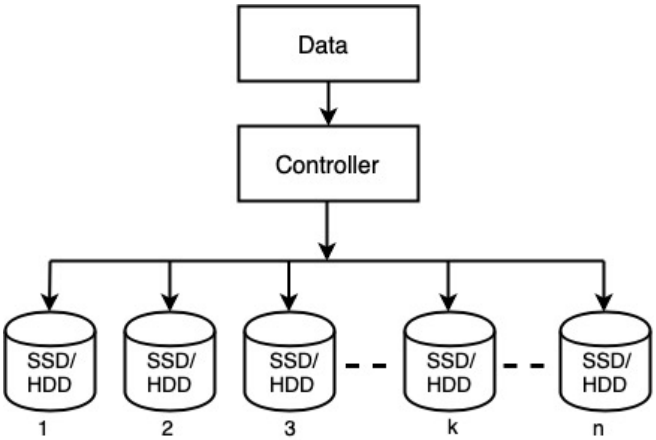


Рис. 1. Структура системи зберігання даних

Масиви дисків також забезпечують надійніше зберігання інформації завдяки чому дані не будуть втрачені у випадку виходу з ладу одного із них. Залежно від обраного рівня RAID, інформація віддзеркалюється або рівномірно розподіляється на дисках системи.

Протягом останніх років у сфері безпечного зберігання інформації значну нішу займають саме RAID технології. Загальна структура RAID системи відображена на рис. 1.

Аналіз існуючих робіт

У [2–5] пропонуються нові механізми побудови RAID, що працюють як звичайна система введення-виведення і оптимізація навантаження на більший дисковий простір. Запропоновані нові архітектури зберігання даних в RAID масивах. Розроблені методики оцінки початкових параметрів надійності, які використовуються в моделі надійності та приклади розрахунку середнього часу втрати даних.

Стаття [6] присвячена питанням побудови систем зберігання даних на твердосплавних накопичувачах (SSD), які широко використовувались на персональних комп'ютерах та в центрах обробки даних. Зокрема, розглядалася проблема впливу різних розподілів паритетів на кілька пристроїв, що впливає на надійність масиву SSD RAID. Слід відмітити, що автори не приділяють належну увагу виявленню та виправленню помилок, які виникають внаслідок обмеженого ресурсу використання твердосплавних накопичувачів.

Послуги зберігання даних дають нові можливості для технології розподіленого збереження інформації, а саме хмарні технології. В роботі [7] представлено систему, яка дозволяє використовувати одночасно декілька різних провайдерів дискового простору та забезпечити доступність і шифрування. Проте в роботі не досліджено можливості втрати зв'язку з одним з провайдерів, що унеможливить доступ до інформації. Використання коригуючих кодів на основі модулярної арифметики для цієї системи надало б можливість мати постійний доступ до даних, незалежно від втрати одного або декількох з них та забезпечило б шифрування інформації.

В [8] розроблені ефективні коригуючі коди СЗК, здатні виявляти та виправляти пакети помилок. Оскільки виявлення та виправлення помилок відбувається з використанням алгоритмів зворотного перетворення, тобто потребує відновлення позиційного подання повідомлення, то це значно ускладнює процес декодування при зростанні кількості символів у повідомленні та розрядності символів.

Частково виправити вказані недоліки дозволяють коригуючі коди в системі залишкових класів, однак вони також характеризуються високою обчислювальною складністю алгоритмів виправлення помилок, а також необхідно перетворювати дані сенсорів у систему залишкових класів [9]. Враховуючи викладене, можна окреслити наступні проблеми при розробці методів для підвищення ефективності систем

зберігання даних: вибір коригуючих кодів на основі досконалої та модифікованої форм системи залишкових класів з мінімальною обчислювальною складністю алгоритмів декодування та можливістю адаптивної зміни коригуючої здатності коду без зміни алгоритму кодування; розробка алгоритмів зберігання розподілених даних поданих в системі залишкових класів.

Надлишкова система залишкових класів

Ідея авторів, полягає у тому, що підвищення надійності роботи системи зберігання даних можна досягти шляхом використання надлишкової системи залишкових класів (НСЗК), яка забезпечує відновлення даних при втраті одного із залишків по певному модулю (модулях).

Система залишкових чисел (СЗК) визначається набором k цілих чисел (модулів) $p_i (i = 1,2,\ldots,k)$.

Якщо всі модулі є попарно взаємно простими числами, то будь-яке ціле число X в діапазоні $[0, P_k)$, де $P_k = \prod_{i=1}^{k} p_i$ може бути однозначно представлено послідовністю залишків x_i: $X = (x_1, x_2, \ldots, x_k)$, де число X у діапазоні $[0, P_k)$ може бути відновлено з k залишків $(x_1, x_2, \ldots, x_k)$, використовуючи китайську теорему про залишки [10].

Відновлення даних здійснюється за формулою $X_j = \left(\sum_{i=1}^{k} x_i \cdot M_i \right) mod\, P_k$., де k – кількість інформаційних модулів; $M_i = \delta_i \cdot m_i$, $\delta_i = \frac{P}{p_i}$, $m_i = \delta^{-1} (mod\ p_i)$, $P_k = \prod_{i=1}^{k} p_i$.

Надлишкову СЗК отримуємо додаванням $r = n - k$ додаткових модулів $(p_{k+1}, p_{k+2}, \ldots, p_n)$, до раніше вибраної системи модулів. В результаті формується НСЗК-код з n додатних попарно взаємно простих модулів.

Тепер ціле число X в діапазоні $[0, P_k)$ подається послідовністю n залишків за модулями $p_1, p_2, \ldots, p_n$:

$$X = (x_1, x_2, \ldots, x_k, \ldots, x_n).$$

Відповідно, інтервал $[0, P_k)$ називається інформаційним (робочим), а інтервал $[P_k, P_n)$, сформований із додаткових модулів r, називається перевірочним діапазоном.

Пропонований метод

Суть методу полягає в наступному: масив отриманих даних, розділяється на фрагменти (блоки) X_j, з яких обчислюються залишки x_i за системою взаємно простих модулів p_i: $x_i = X_j (mod\ p_i)$.

Отримані залишки розподілені на окремі носії (диски). Враховуючи, що при кодуванні використовується розширена система модулів, для відновлення даних нам необхідна тільки частина залишків (рис. 2).

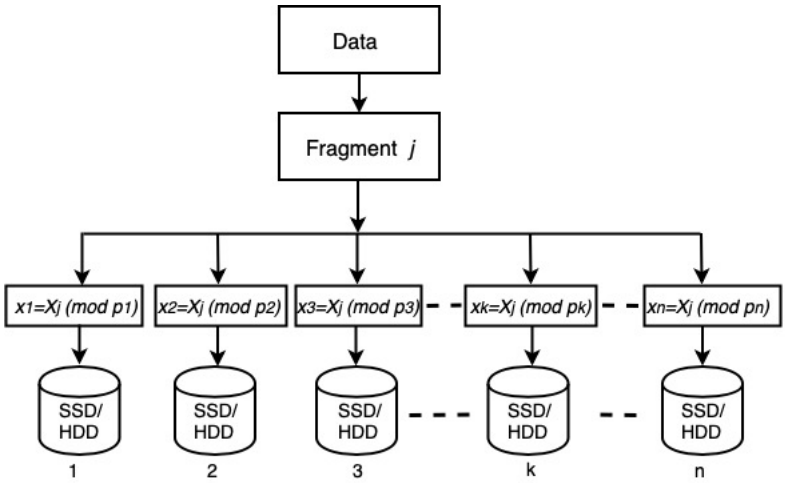


Рис. 2. Система надійного зберігання даних на основі НСЗК

Відновлення спотворених або втрачених даних здійснюється за формулою:

$$X_j = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot M_i \right) mod\, P_n, \quad (1)$$

де n – кількість модулів; $P_n = \prod_{i=1}^{n} p_i$.

Коригуюча здатність надлишкової СЗК визначається кількістю введених додаткових модулів. При додаванні r додаткових модулів, надлишкова СЗК здатна виявляти r виправляти помилки в $r/2$ залишках [11].

Основною перевагою НСЗК є рівноцінність (взаємозамінність) інформаційних та перевірочних символів, що дозволяє відновлювати фрагменти даних при спотворенні чи виході з ладу цілого блоку залишків за одним з модулів.

Надлишкова системи залишкових класів дозволяє відновити втрачений фрагмент даних з використанням тільки одного перевірочного модулю, якщо відомо, який саме з блоків даних був втрачений. У системах зберігання даних, на відміну від передачі даних, визначити неробочий носій можна, застосовуючи інші методи та засоби діагностики.

Приклад. Розглянемо приклад використання системи залишків. Виберемо систему модулів: $p_i = [227, 229, 233, 239, 241, 251]$. Загальний діапазон системи модулів становитиме: P_n =175 107 974 924 611.

Робочий діапазон: P_k =697 641 334 361. Базисні числа $M_i = [132680932541996$, 16822600211098, 174356438551544, 114296418779244, 51587826637541, 35579708052411].

Нехай блок даних у десятковій системі числення становіть $X_j = 12350$, то подання цього числа в системі залишків матиме вигляд: $X_j = [92, 213, 1, 161, 59, 51]$. Згідно з формулою (1)

$$X_j = \left(X_0 * M_0 + X_1 * M_1 + X_2 * M_2 + X_3 * M_3 + X_4 * M_4 + X_5 * M_5\right) \% P_n =$$
$$= (92 * 132680932541996 + 213 * 16822600211098 + 1 *$$
$$* 174356438551544 + 161 * 114296418779244 + 59 * 51587826637541 +$$
$$+ 51 * 35579708052411) \% 175107974924611 = 12350$$

При спотворенні одного і з залишків, за умови, що ми знаємо який із залишків зазнав спотворення, ми можемо відновити втрачені дані. Припустимо, що втрачено $X_4 = 59$. Тоді формула відновлення даних буде мати вигляд:

$$X_j = \left(X_0 * M_0 + X_1 * M_1 + X_2 * M_2 + X_3 * M_3 + X_5 * M_5\right) \% \left(\frac{P_n}{p_4}\right) =$$
$$= (92 * 132680932541996 + 213 * 16822600211098 +$$
$$+ 1 * 174356438551544 + 161 * 114296418779244 + 51 * 35579708052411) \% \left(\frac{175107974924611}{241}\right) = 12350.$$

Проведений аналіз використання систем модулів для кодування та декодування інформаційних фрагментів кратних 8 біт показав, що використання таких модулів дозволяє мінімізувати надлишкову інформацію. На основі проведених досліджень можна сказати, що збільшення кількості модулів зменшує надлишковість інформації, яка зберігається на носіях даних. Для виявлення однієї помилки у кодах НСЗК достатньо одного модуля, проте для її виправлення необхідно два перевірочних модулі. Вибрані системи модулів та їх характеристики відображено в таблиці 1.

Таблиця 1

НСЗК з двома перевірочними модулями

Набір модулів НСЗК	Кількість модулів, *(n, k)**	Розмір фрагмента, біт	Загальний діапазон, біт	Надлишковість, %
[227,229,233,239,241, 251]	(6, 4)	24	48	100,
[223,227,229,233,239, 241,251]	(7, 5)	32	56	75,0
[211,223,227,229,233,239,241,251]	(8, 6)	40	64	60,0
[199,211,223,227,229,233,239,241,251]	(9, 7)	48	72	50,0
[197,199,211,223,227,229,233,239,241,251]	(10, 8)	56	80	42,9
[193,197,199,211,223,227,229,233,239,241, 251]	(11, 9)	64	88	37,5

де *n* – загальна кількість модулів, *k* – кількість інформаційних модулів.

Як видно з таблиці 1, використання кількості модулів меншої або рівної шість є неефективним, оскільки надлишок інформації становить 100%, а отже, відповідає технології RAID рівня 1. При збільшенні кількості модулів надлишковість інформації зменшується завдяки зростанню фрагмента інформації, який опрацьовується за один цикл роботи.

Таблиця 2

НСЗК з одним перевірочним модулем

Набір модулів НСЗК	Кількість модулів, *(n, k)**	Розмір фрагмента, біт	Загальний діапазон, біт	Надлишковість, %
[227,229,233,239,241,251]	(6, 5)	32	48	50,0
[223,227,229,233,239,241,251]	(7, 6)	40	56	40,0
[211,223,227,229,233,239,241,251]	(8, 7)	48	64	33,3
[199,211,223,227,229,233,239,241,251]	(9, 8)	56	72	28,6
[197,199,211,223,227,229,233,239,241,251]	(10, 9)	64	80	25,0
[193,197,199,211,223,227,229,233,239,241,251]	(11, 10)	72	88	22,2

де *n* – загальна кількість модулів, *k* – кількість інформаційних.

Проте таке використання перевірочних модулів є не доцільним при роботі з масивами дисків. При втраті зв'язку чи виході з ладу одного із дисків нам відомо, який саме з них не працює. Це дає змогу зменшити необхідну кількість перевірочних модулів для виправлення фрагмента даних. В таблиці 2 відображено систему наборів модулів використану в попередньому прикладі, проте в ній тільки один модуль виконує роль перевірочного.

Завдяки тому, що кількість перевірочних модулів зменшилась, ми можемо опрацювати за один цикл роботи на 8 біт більше. Завдяки цьому надлишок інформації зменшився у 2 рази при використанні системи з 6 модулів.

Одним з значних недоліків використання системи модулів з більшою кількістю k, є збільшення необхідної кількості носіїв для зберігання даних, проте завдяки цьому зменшується надлишковість та час опрацювання даних. Час, необхідний для опрацювання пакету даних розміром 50 Мб залежно від вибраної системи рівнянь, наданий на рис. 3. Дослідження проводились на комп'ютері з двоядерним процесором Intel Core i5-2430M (2.4 ГГц) та обсягом пам'яті 6 ГБ.

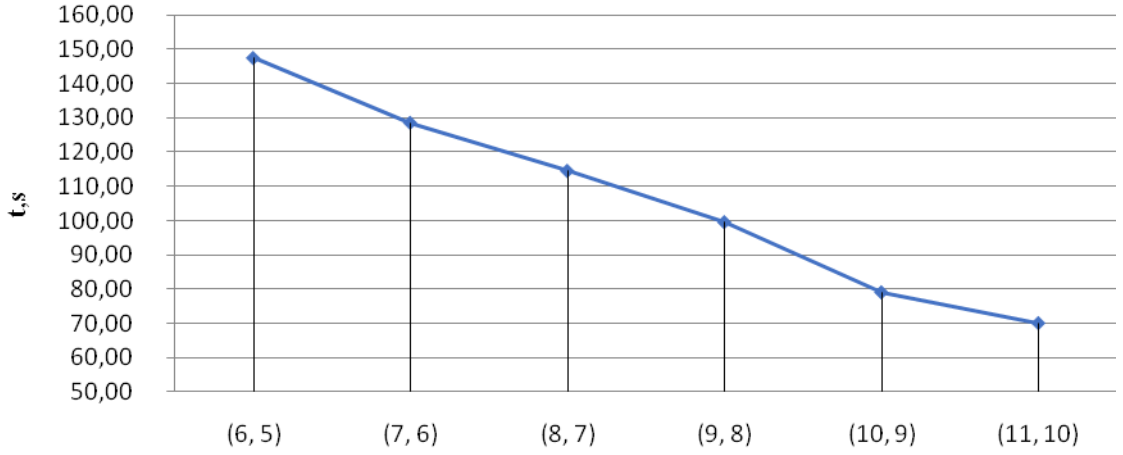


Рис. 3. Залежність часу від обраної системи модулів при опрацювання фрагменту розміром 50 Мб

Як видно з рисунку 3 перехід до використання системи з більшою кількістю модулів дозволяє збільшити швидкодію на 13–15% в порівнянні з попередньою. Проте варто враховувати, що збільшення кількості модулів потребує потужнішої апаратної бази для кодування та декодування даних.

Іншим шляхом підвищення швидкодії роботи з фрагментами даних є використання системи із значно більшими значеннями модулів, наприклад, $p_i = [10313,\ 10321,\ 10331,\ 10333]$. Загальний діапазон такої системи залишків становить 54 біти, а робочий 40. Завдяки більшим значення модулів, цю систему по розміру робочого фрагмента можна порівняти з системою (7,6) із таблиці 2. Графік зростання часу, затраченого на кодування залежно від вибраного методу, наведено на рис. 4, а час, затрачений на декодування – на рис. 5.

Як видно з рисунків 4 та 5, процес кодування та декодування даних на основі НСЗК при обраних системах модулів є лінійним, а отже не залежить від розміру робочого фрагмента. Проте, завдяки збільшенню розрядності використаних модулів ми отримуємо зменшення часу обробки фрагмента при кодуванні та декодуванні у 1,8-2,1 рази.

Порівняння ефективності відомих RAID масивів та запропонованих з використанням системи залишкових класів наведено в таблиці 3.

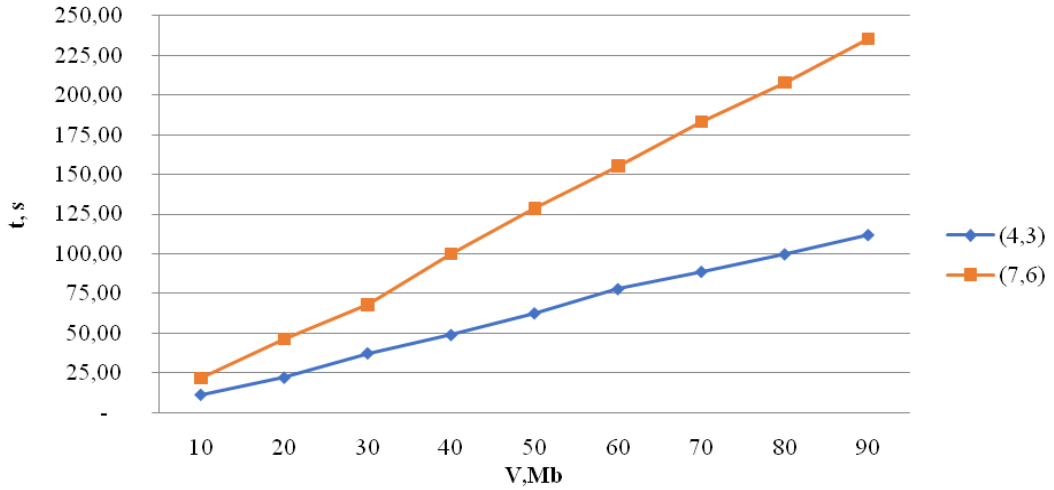


Рис. 4. Кодування даних заданими наборами модулів

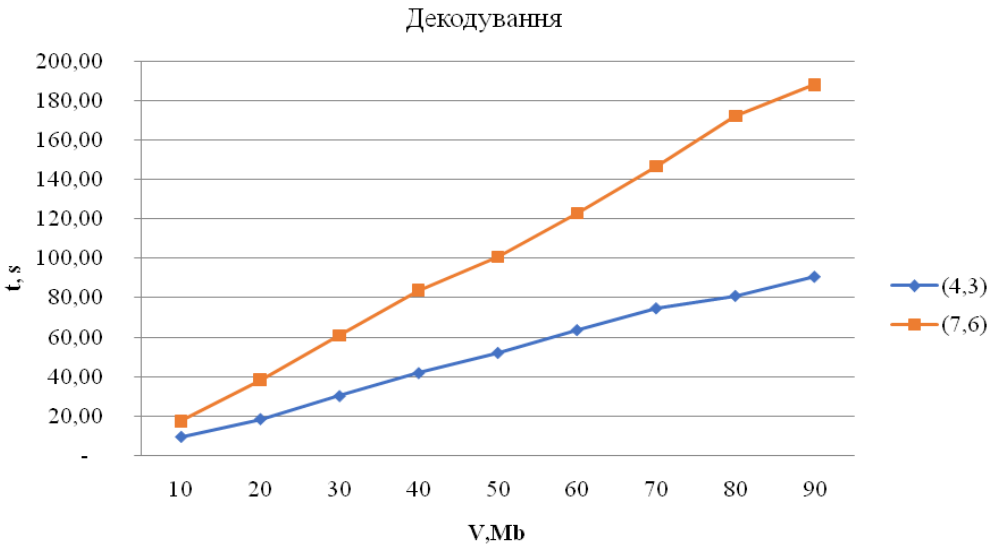


Рис. 5. Декодування даних заданими наборами модулів

Таблиця 3

Порівняння ефективності різних типів RAID масивів

Тип RAID масиву	Ефективний обсяг	Мінімальна кількість дисків	Допустима кількість дисків, що вийшли з ладу (Відмовостійкість)
1	2	3	4
RAID 0	$I = S \cdot N$	2	Немає
RAID 1	$I = S$	2	$(n-1)$ несправний диск
RAID 2	$I = S \cdot (N-2)$		Один несправний диск
RAID 3	$I = S \cdot (N-1)$	3	Один несправний диск
RAID 4	$I = S \cdot (N-1)$	3	Один несправний диск
RAID 5	$I = S \cdot (N-1)$	3	Один несправний диск
RAID 6	$I = S \cdot (N-2)$	4	Два несправних диски
RAID DP	$I = S \cdot (N-2)$	6	Два несправних диски
RAID 10	$I = S \cdot N / 2$	4	від 1 до N/2 дисків (інформація не втратиться, якщо вийдуть з ладу диски в межах різних дзеркал)
RAID 50	$I = S \cdot (N-2)$	6	від 1 до 2 дисків (інформація не втратиться, якщо вийде з ладу однакова кількість дисків в різних масивах)
RAID 60	$I = S \cdot (N-4)$	8	від 2 до 4 дисків (інформація не втратиться, якщо вийде з ладу однакова кількість дисків в різних масивах)
RAID RRNS1	$I = S \cdot (N-1)$	3	Один несправний диск
RAID RRNS2	$I = S \cdot (N-2)$	4	Два несправних диска

Тут N – кількість дисків в масиві, S – об'єм найменшого диска.

Розроблена система забезпечує високу надійність під час зберіганні даних завдяки можливості відновити фрагмент даних при виході з ладу одного з дисків, а також захищеність інформації при розподіленому зберіганні на віддалених носіях. Це відбувається завдяки тому, що для відновлення будь-якого фрагменту даних необхідно отримати фізичний або віртуальних доступ до більшості дисків.

Перевагою пропонованого методу є значно менша надлишковість для відновлення даних, у порівнянні з технологіями RAID та системами на основі інших коригуючих кодів.

Висновки

На основі проведених досліджень було запропоновано метод використання надлишкової системи залишкових класів для підвищення надійності роботи систем зберігання даних. Завдяки рівноцінності інформаційних та перевірочних символів ми можемо відновити втрачений блок даних з використанням тільки одного перевірочного модулю. У системах зберігання даних, на відміну від передачі даних, визначити неробочий носій можна, застосовуючи інші методи та засоби діагностики.

Проведено експериментальні дослідження залежності необхідного часу опрацювання пакету даних від обраної системи модулів. Отже, перехід до використання системи з більшою кількістю модулів дозволяє

збільшити швидкодію на 13–15% в порівнянні з попередньою, відповідно збільшення розрядності дозволяє підвищити швидкість кодування та декодування у 1,81-2,11 рази.

Розроблена система забезпечує високу надійність зберігання даних за рахунок можливості відновлення даних при виході з ладу частини дисків, а також високу захищеність даних при їх розподіленому зберіганні.

Література

1. Garth A. Network attached storage architecture / Garth A. Gibson and Rodney Van Meter // Communications of the ACM. – New York, 2000. – Vol. 43 (№ 11). – P. 37–45.
2. Guangyan Zhang. RAID+: Deterministic and Balanced Data Distribution for Large Disk Enclosures / Guangyan Zhang, Zican Huang, Xiaosong Ma, Songlin Yang, Zhufan Wang, Weimin Zheng // This paper is included in the Proceedings of the 16th USENIX Conference on File and Storage Technologies. – Oakland, February 12–15, 2018. – P. 280–283.
3. Wan J. Thin RAID: Thinning Down RAID Array for Energy Conservation / J. Wan, X. Qu, N. Zhao, J. Wang and C. Xie // IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems. – 2015. – Vol. 26 (№ 10). – P. 2903–2915.
4. Rahman P. A. Reliability model of disk arrays RAID-5 with data striping / P. A. Rahman and G. D'K Novikova, Freyre Shavier // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 788–794.
5. Keval Kachhala. RAID (Redundant Array of independent Disks) / Keval Kachhala, Rupali Gangarde // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – May 2016. – Vol. 35 (№ 12). – P. 574–577.
6. Yongkun Li. Analysis of Reliability Dynamics of SSD RAID / Yongkun Li, P. C. Lee, John C. S. Lui // IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS. – 2014. – P. 1–14.
7. Antonio Celesti. Adding long-term availability, obfuscation, and encryption to multi-cloud storage systems / Antonio Celesti, Maria Fazio, Massimo Villari, Antonio Puliafito // Journal of Network and Computer Applications. – January 2016. – Vol. 59. – P. 208–218.
8. Tay Thian Fatt. A new algorithm for single residue digit error correction in Redundant Residue Number System / Tay Thian Fatt // Circuits and Systems (ISCAS), IEEE International Symposium IEEE. – 2014. – P. 1748–1751.
9. Alsheikh M. A. Rate-distortion Balanced Data Compression for Wireless Sensor Networks / Alsheik M. A., Lin S., Niyato D., & Tan H. P. // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16 (№12). – P. 5072–5083.
10. Xiao H. New Error Control Algorithms for Residue Number System Codes / Xiao H., Garg H. K., Hu J., & Xiao G // ETRI Journal. – 2016. – Vol. 38 (№ 2). – P. 326–336.
11. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах / Акушский И. Я., Юдицкий Д.И. – М. : Сов. радио. 1968. – С. 460.
12. Кулина С.В. Виявлення помилок на основі коригуючих кодів системи залишкових класів / С.В. Кулина // Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. – Чернівці : «Місто», 2018. – С. 126–127.

References

1. Garth A. Network attached storage architecture / Garth A. Gibson and Rodney Van Meter // Communications of the ACM. – New York, 2000. – Vol. 43 (№ 11). – P. 37–45.
2. Guangyan Zhang. RAID+: Deterministic and Balanced Data Distribution for Large Disk Enclosures / Guangyan Zhang, Zican Huang, Xiaosong Ma, Songlin Yang, Zhufan Wang, Weimin Zheng // This paper is included in the Proceedings of the 16th USENIX Conference on File and Storage Technologies. – Oakland, February 12–15, 2018. – R. 280–283.
3. Wan J. Thin RAID: Thinning Down RAID Array for Energy Conservation / J. Wan, X. Qu, N. Zhao, J. Wang and C. Xie // IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems. – 2015. – Vol. 26 (№ 10). – P. 2903–2915.
4. Rahman P. A. Reliability model of disk arrays RAID-5 with data striping / P. A. Rahman and G. DK Novikova, Freyre Shavier // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – R. 788–794.
5. Keval Kachhala. RAID (Redundant Array of independent Disks) / Keval Kachhala, Rupali Gangarde // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – May 2016. – Vol. 35 (№ 12). – R. 574–577.
6. Yongkun Li. Analysis of Reliability Dynamics of SSD RAID / Yongkun Li, P. C. Lee, John C. S. Lui // IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS. – 2014. – R. 1–14.
7. Antonio Celesti. Adding long-term availability, obfuscation, and encryption to multi-cloud storage systems / Antonio Celesti, Maria Fazio, Massimo Villari, Antonio Puliafito // Journal of Network and Computer Applications. – January 2016. – Vol. 59. – P. 208–218.
8. Tay Thian Fatt. A new algorithm for single residue digit error correction in Redundant Residue Number System / Tay Thian Fatt // Circuits and Systems (ISCAS), IEEE International Symposium IEEE. – 2014. – P. 1748–1751.
9. Alsheikh M. A. Rate-distortion Balanced Data Compression for Wireless Sensor Networks / Alsheik M. A., Lin S., Niyato D., & Tan H. P. // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16 (№12). – P. 5072–5083.
10. Xiao H. New Error Control Algorithms for Residue Number System Codes / Xiao H., Garg H. K., Hu J., & Xiao G // ETRI Journal. – 2016. – Vol. 38 (№ 2). – P. 326–336.
11. Akushskij I. Ya. Mashinnaya arifmetika v ostatochnyh klassah / Akushskij I. Ya., Yudickij D.I. – M. : Sov. radio. 1968. – S. 460.
12. Kulyna S.V. Vyiavlennia pomylok na osnovi koryhuiuchykh kodiv systemy zalyshkovykh klasiv / S.V. Kulyna // Fizyko-tekhnolohichni problemy peredavannia, obroblennia ta zberihannia informatsii v infokomunikatsiinykh systemakh : materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Chernivtsi : «Misto», 2018. – S. 126–127.

Рецензія/Peer review : 10.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: к.т.н., доц. Кочан В.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-105-109
УДК 004.774

А.О. АЗАРОВА, А.А. ШИЯН, С.П. МУРЗА, А.В. КУДЛИК, Т.С. КОСТЮК
Вінницький національний технічний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХИЩЕНОГО КОНСОЛІДОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ АНАЛІЗУ РИНКУ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕДИЧНИМИ ЛАБОРАТОРІЯМИ В УКРАЇНІ

В статті описано процес розроблення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні. Основною перевагою консолідованого інформаційного ресурсу перед іншими системами є те, що він містить у собі всю необхідну та об'єктивну інформацію, а саме, вартість аналізів, дохід лабораторій за місяць, сезон, рік, кількість проведених аналізів, відкритих філіалів в Україні та ін., що дозволяє швидко та якісно вирішувати поставлені перед управлінцями медичних лабораторій задачі. Для розроблення даного ресурсу було обрано СУБД MS SQL, а для реалізації програми – програмний каркас ASP.NET MVC. Керування ресурсом реалізовано за допомогою звітів, графіків та запитів. Звіти для аналізу ефективності роботи ринку надання послуг медичними лабораторіями створено засобами мови програмування JavaScript.

Ключові слова: захищений консолідований інформаційний ресурс, дані, база даних.

A.O. AZAROVA, A.A. SHIYAN, S.P. MURZA, A.V. KUDLYK, T.S. KOSTYUK
Vinnytsia National Technical University

SECURED CONSOLIDATED INFORMATION RESOURCE OF THE ANALYSIS OF MARKET FOR MEDICAL LABORATORY SERVICES PROVIDING

There is a lack of orderly existing information in the field of providing services by medical laboratories in Ukraine. In order to develop this field and increase the profitability of medical laboratories, it is necessary to analyse the current state of this field, the problem points and possible ways to improve them. For convenience of analysis, the data set should be presented in aggregated form. A consolidated information resource for analysing of market for medical laboratories services provides an opportunity to evaluate the market situation objectively and to improve it by making effective management decisions in Ukraine. For realization of this resource was used SCBD MS SQL and for realization of program – program frame ASP.NET MVC. The purpose of the article is to develop the secured consolidated information resource for analysing the market for medical laboratories in Ukraine which will provide accurate information on medical laboratories and will be a tool for data collection, processing, analysis and reporting. The subject of the study is a set of theoretical and practical bases for the creation of a consolidated information resource for analysing the market of medical laboratories in Ukraine.

Keywords: secured consolidated information resource, data, database.

Вступ

Ринок приватної медицини почав плавно розвиватися ще в 90-х роках XX ст., однак активно нові заклади – клініки, лабораторії, лікувально-курортні установи – почали з'являтися в 2000–2010-х роках. Оскільки лабораторна медицина є невід'ємною частиною медицини в цілому, її розвиток багато в чому залежить від існуючих у даний час пріоритетів у сфері охорони здоров'я. Очевидним є той факт, що діагноз, заснований на лабораторних даних, повинен давати лікареві впевненість у надійності та достовірності результатів лабораторних досліджень. Тому консолідація інформації має велике значення для оптимізації діяльності даної сфери, оскільки дає конкурентну перевагу та можливість збирати необхідну для бізнесу інформацію, а також дозволяє пацієнтам отримати повну інформацію про ту чи іншу медичну організацію.

У деяких медичних закладах вже створено і використовуються бази даних, в яких зберігається постійно оновлювана, максимально деталізована і систематизована за різними ознаками, що суттєво покращує їх діяльність. Проте, ситуація з комплексним управлінням ринку медичних послуг залишається невизначеною, оскільки відсутнім є загальний інформаційний ресурс, що уможливлює отримання агрегованої, прозорої та чіткої інформації у цій сфері. Отже, розроблення консолідованого інформаційного ресурсу аналізу всього медичного ринку є актуальним і важливим для ефективного його функціонування.

Окремі аспекти розвитку консолідованої інформації у медичних закладах містяться у працях багатьох дослідників, зокрема, Н. І. Борисова, М. Ф. Бондаренко, С. І. Маторіна, Є. А. Соловйова. Разом із тим, у існуючих методах відсутнім є комплексний підхід, який дозволяв би отримання захищених засобів для отримання інформації аналітичного характеру. Отже, метою статті є розроблення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні, який дозволяє оптимізувати оброблення та агрегацію інформації про медичні лабораторії країни шляхом удосконалення процесів збирання, збереження, аналізу даних і створення звітів.

Об'єктом дослідження є сукупність теоретичних і практичних засад створення консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні.

Результати дослідження

Консолідована інформація – це публічні знання, спеціально підібрані, проаналізовані, оцінені та, можливо, реструктуризовані та перекомпоновані з метою надання деяких негайних рішень проблем та інформаційних потреб визначеної клієнтури або соціальної групи, які можуть не мати можливості ефективно отримувати доступ до цих знань та використовувати їх як доступні в кількох документах або в

іншій формі [1]. Для розроблення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні було обрано СУБД MS SQL, оскільки вона є зручною вільною реляційною СУБД, що відповідає протоколам захисту інформації та дозволяє створити інформаційну систему, яка працює з базою даних. Серед базових можливостей MS SQL слід відзначити такі [2]:

– підходить для середніх і великих інформаційних об'єктів з високим завантаженням;

– швидкодія – працює відмінно при будь-якому навантаженні, практично не має обмежень щодо обсягу даних і швидкодії системи;

– безпека – MS SQL – це SQL-сервер високого класу, який забезпечує управління базою даних, її безпеку і стабільність роботи, MS SQL гарантує найвищий рівень захисту даних і практично не створює жодних проблем;

– простота установки – Microinvest надає два інсталяційних файли MS SQL (x86 і x64), MS SQL працює з усіма версіями Windows, в установчому диску є докладні інструкції для установки цього сервера.

Отже, MS SQL – сервер з потужними можливостями, високою швидкістю і максимальною безпекою.

Зважаючи на те, що для розроблення даного ресурсу було обрано СУБД MS SQL, то очевидно, що для реалізації програми для бази даних медичних лабораторій найкращим рішенням є програмний каркас ASP.NET MVC, який, як і MS SQL, є продуктом компанії Microsoft і має досить високий рівень взаємодії з компонентами цієї СУБД [3].

Програмний каркас ASP.NET створено мовою програмування C#, тому програма реалізовується саме мовою програмування C#. Вона за всіма параметрами цілком влаштовує вимоги користувачів інформації щодо цієї галузі та задовольняє потреби захисту такого програмного продукту. Дана мова програмування дозволяє побудувати надійний та ефективний код [4].

До основних етапів створення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу належать:

– проектування ER-моделі захищеного консолідованого інформаційного ресурсу (КІР);

– нормалізація бази даних (БД);

– розроблення та реалізація бази даних;

– формування звітів для відображення консолідованих даних;

– захист інформації у БД створеного КІР.

Розглянемо кожен етап окремо.

Етап 1. Проектування ER-моделі консолідованого інформаційного ресурсу. Загальний підхід до побудови бази даних за методом «сутність – зв'язок» полягає в побудові ER-моделі (діаграми ER-типу), що включає в себе усі сутності та зв'язки, важливі з точки зору інтересів організації бази даних [5]. Для створення бази даних необхідно враховувати всі особливості обраної галузі. Для того щоб правильно побудувати базу даних потрібно спроектувати для неї ER-моделі за принципом «сутність – зв'язок».

Модель «сутність – зв'язок» являє собою набір концепцій, які використовуються для опису логічної структури бази даних.

Проектування баз даних методом сутність-зв'язок складається з таких етапів – визначення: сутностей; зв'язків; атрибутів; ключів; ступеня зв'язку та класу належності.

На першому етапі проектування необхідно визначити сутності. Сутність – це деякий об'єкт, що представляє інтерес для користувача [5]. З точки зору заданої предметної області користувачами бази даних будуть представники консолідованого інформаційного центру. Отже, автори статті пропонують таку ER-модель консолідованого інформаційного ресурсу, що запропоновано на рис. 1.

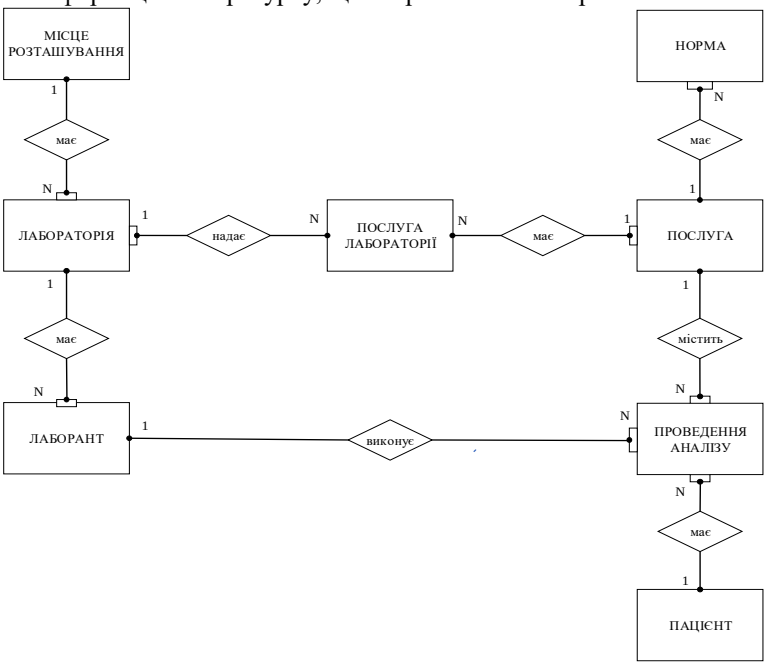


Рис. 1. ER-модель консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями України

У результаті проектування ER-моделі консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями України авторами статті визначено ряд сутностей: Лабораторія, Місце розташування, Лаборант, Послуга Лабораторії, Послуга, Проведення аналізу, Пацієнт, Норма, що поєднуються між собою обов'язковими та не обов'язковими відношеннями, типу «один до одного», «один до багатьох» та «багато до одного». У процесі проектування кожна з визначених сутностей отримує ряд атрибутів. Виділимо атрибути цих сутностей:

Сутності Лабораторія відповідають такі атрибути: Код Лабораторії, Назва Лабораторії, Код Лаборанта, Код Місця Розташування;

Сутності Місце Розташування відповідають такі атрибути: Код Місця Розташування, Назва Місця Розташування;

Сутності Лаборант відповідають такі атрибути: Код Лаборанта, ПІБ Лаборанта, Код Проведення Аналізу;

Сутності Послуга Лабораторії відповідають такі атрибути: Код Лабораторії, Код Послуги;

Сутності Послуга відповідають такі атрибути: Код Послуги, Назва Послуги, Код Норми, Код Проведення Аналізу;

Сутності Проведення Аналізу відповідають такі атрибути: Код Проведення Аналізу, Назва Проведення Аналізу, Код Пацієнта;

Сутності Пацієнт відповідають такі атрибути: Код Пацієнта, ПІБ Пацієнта, Дата Народження Пацієнта, Стать Пацієнта;

Сутності Норма відповідають такі атрибути: Код Норми, Назва Норми, Вік Початку, Вік Кінця, Стать).

Кожен атрибут сутності, який починається зі слова Код і містить у собі назву сутності, є ключовим атрибутом даної сутності.

Етапи 2. Нормалізація отриманих відношень у створеній ER-моделі. Наступним етапом проектування бази даних є нормалізація відношень, розроблених за методом «сутність – зв'язок», що дозволяє перевірити базу даних на аномалії цілісності.

Нормалізація – покроковий зворотний процес декомпозиції (розкладання) вихідних відношень бази даних на більш дрібні та прості відношення. Нормалізація виконується для усунення небажаних залежностей між атрибутами, для усунення надлишковості, для усунення вставки, оновлення та видалення [4].

У результаті проведення нормалізації авторами статті було отримано такі відношення:

– R1 (<Код Лабораторії>, Назва Лабораторії, Код Місця Розташування, Назва Місця розташування, <Код Лаборанта>, ПІБ Лаборанта, Код Послуги Лабораторії, Код Послуги, Назва Послуги, Вартість Послуги, <Код Норми>, Назва Норми, Вік Почастку, Вік Кінця, Стать);

– R2 (<Код Пацієнта>, ПІБ Пацієнта, Дата Народження Пацієнта, Стать Пацієнта);

– R3 (<Код Проведення Аналізу>, Назва Проведення Аналізу, Код Послуги, Код_Лабораторії, Код Пацієнта);

– R4 (<Код Лабораторії>, Назва Лабораторії);

– R5 (<Код Місця Розташування>, Назва Місця Розташування);

– R6 (<Код Лаборанта>, ПІБ Лаборанта);

– R7 (<Код Послуги>, Назва Послуги, Вартість Послуги);

– R8 (<Код Норми>, Назва Норми, Вік Початку, Вік Кінця, Стать).

На основі цих відношень відбувається подальше розроблення бази даних.

Етап 3. Розроблення та реалізація бази даних. Технологія Entity Framework Code First дозволяє описувати сутності у вигляді класів із набором властивостей, які відповідають атрибутам сутностей, а також дозволяє налаштувати зв'язки між сутностями. Зв'язки між сутностями розпізнаються та налаштовуються автоматично, але в деяких випадках використовується налаштування зв'язків за допомогою атрибутів до властивостей класу. На рис. 2 авторами статті зображено структурну схему реалізації бази даних.

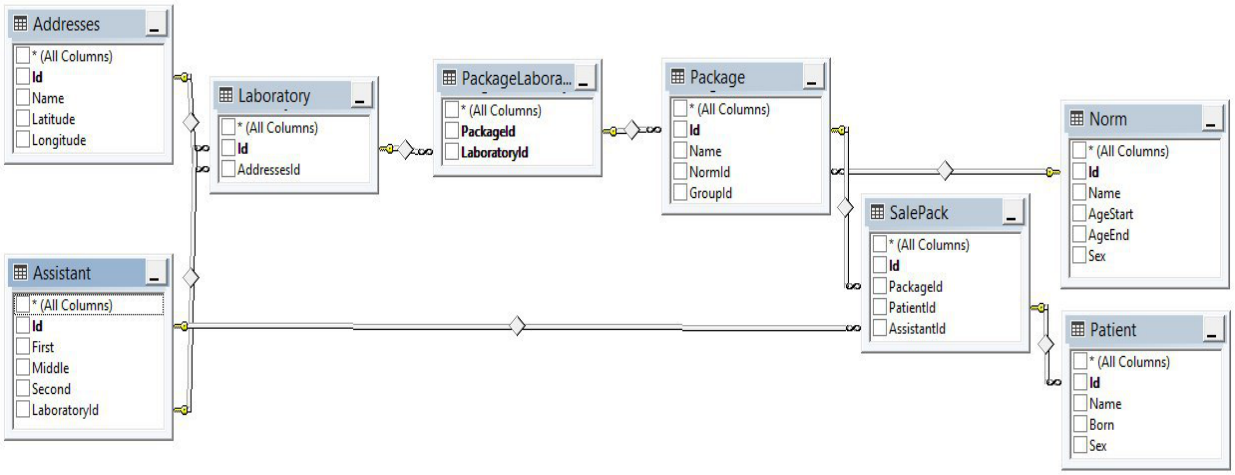


Рис. 2. Структурна схема бази даних консолідованого ресурсу

4. Формування звітів для відображення консолідованих даних. Консолідований інформаційний ресурс для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями України повинен відображати інформацію про аналізи, медичні лабораторії, та медичні послуги. Їх можливо реалізувати за допомогою запитів, звітів, таблиць та форм.

На першій вкладці, яка зображена на рис. 3, відображається кількість наданих послуг лабораторіями за місяць (середнє арифметичне за рік).

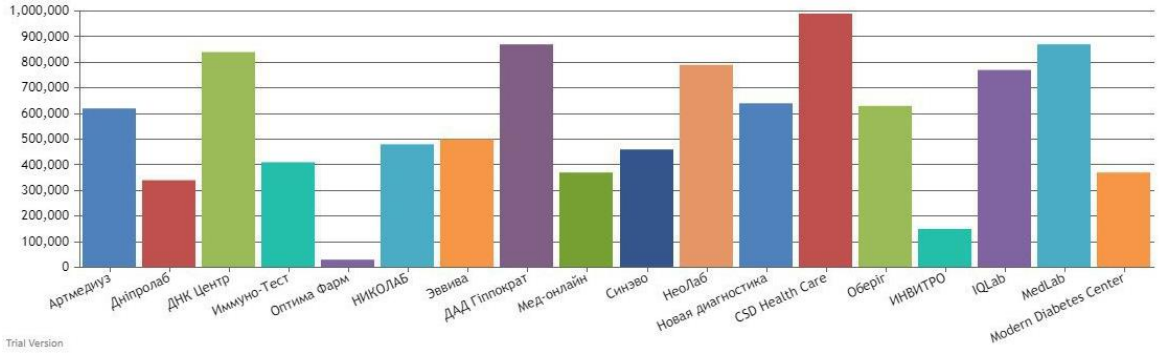


Рис. 3. Перша вкладка інформаційного ресурсу

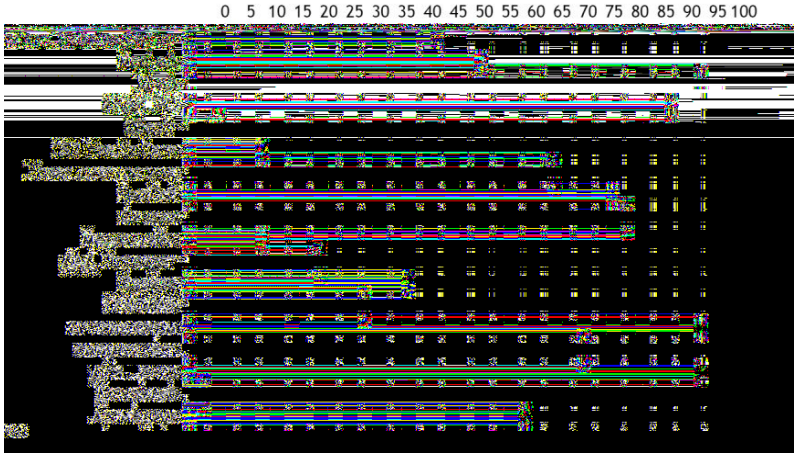


Рис. 4. Діаграма рейтингу по філіалах

На базі даного графіку видно, які з лабораторій України надають найбільшу кількість послуг за місяць порівняно з іншими.

Основні сторінки, на яких представлено дані, зображено у вигляді графіків і звітів. Сторінка «Філіалів» містить у собі графік, на якому відображається консолідована інформація, пов'язана з кількістю відкритих лабораторій по всій Україні. Наприклад, сторінка яка зображена на рис. 4, відображає рейтинг за кількістю філіалів. На даній діаграмі можна побачити, які з медичних лабораторій відкрили найбільше філіалів по Україні.

На сторінці «Популярні аналізи» відображаються дані, що показують найбільш популярні аналізи за їх проведеною кількістю (рис. 5).

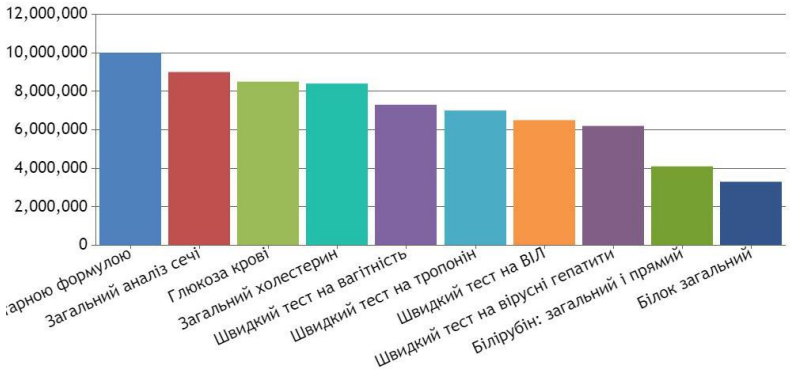


Рис. 5. Діаграма рейтингу аналізів за кількістю

Також в даній групі можна вибрати місячний графік доходу по вибраному аналізу (рис. 6).

Етап 5. Захист особистих даних користувача в створеному консолідованому інформаційному ресурсі. Для захисту особистих даних користувача використовується SSL сертифікат – криптографічний протокол, який забезпечує встановлення безпечного з'єднання між клієнтом і сервером.

Рис. 6. Діаграма місячного доходу по аналізу

Протокол забезпечує конфіденційність обміну даними між клієнтом і сервером, що використовують TCP/IP, причому для шифрування використовується асиметричний алгоритм з відкритим ключем. Під час шифрування з відкритим ключем використовуються два ключі, причому будь-який з них може використовуватися для шифрування повідомлення. Таким чином, якщо використовується один ключ для шифрування, то відповідно для розшифрування потрібно використовувати інший ключ. У такій ситуації можна отримувати захищені повідомлення, публікуючи відкритий ключ, і зберігаючи в таємниці секретний ключ.

Висновки

У статті розроблено захищений консолідований інформаційний ресурс для аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні. Основною перевагою консолідованого інформаційного ресурсу перед іншими системами є те, що він містить у собі всю необхідну та об'єктивну інформацію, що дозволяє швидко та якісно розв'язувати поставлені перед управлінцями медичних лабораторій задачі. Перспективність застосування створеного консолідованого ресурсу у роботі медичних лабораторій є безперечною, оскільки дозволить збільшити прибутки, удосконалити систему прийняття управлінських рішень та оптимізувати їх роботу.

Література

1. Жежнич П. І. Консолідовані інформаційні ресурси баз даних та знань : навч. посіб. / Жежнич П. І. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 212 с.

2. Кунанець Н. Е. Вступ до спеціальності «Консолідована інформація» : навч. посіб. / Кунанець Н. Е., Пасічник В. В. – Львів : «Львівська політехніка», 2010. – 196 с. – (Серія «Консолідована інформація». Вип. 1).

3. Аббакумов А. А. Базы данных (MS SQL Server) / Аббакумов А. А., Егунова А. И., Таланов В. М. – С. : Изд-во СВМО, 2015. – 66 с.

4. Матвієнко О. В. Консолідована інформація : навч. посіб. / Матвієнко О. В., Цивін М. Н. – Київ : «Центр учбової літератури», 2014. – 134 с.

5. Визначення бази даних і банку даних. Склад і структура банку даних. URL : http://e-educ.ru/bd1.html.

References

1. Zhezhnych P. I. Konsolidovani informatsiini resursy baz danykh ta znan : navch. posib. / Zhezhnych P. I. – Lviv : Lvivska politekhnika, 2010. – 212 s.

2. Kunanets N. E. Vstup do spetsialnosti «Konsolidovana informatsiia» : navch. posib. / Kunanets N. E., Pasichnyk V. V. – Lviv : «Lvivska politekhnika», 2010. – 196 s. – (Seriia «Konsolidovana informatsiia». Vypusk 1).

3. Abbakumov A. A. Bazy dannyh (MS SQL Server) / Abbakumov A. A., Egunova A. I., Talanov V. M. – S. : Izd-vo SVMO, 2015. – 66 s.

4. Matviienko O. V. Konsolidovana informatsiia : navch. posib. / Matviienko O. V., Tsyvin M. N. – Kyiv : «Tsentr uchbovoi literatury», 2014. – 134 s.

5. Vyznachennia bazy danykh i banku danykh. Sklad i struktura banku danykh. URL : http://e-educ.ru/bd1.html.

Рецензія/Peer review : 2.12.2019 р. Надрукована/Printed : 12.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Лужецький В. А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-110-115
УДК 621.391

О.В. КРУЛІКОВСЬКИЙ, С.Д. ГАЛЮК
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ЦИКЛІЧНІСТЬ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, ГЕНЕРОВАНИХ МЕМРИСТОРНОЮ ХАОТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

В роботі на прикладі математичної моделі мемристорного генератора хаотичних коливань вивчається доцільність застосування методів чисельного рішення диференційних рівнянь високої точності в криптографічних алгоритмах. Використовуючи Simulink-моделі хаотичної системи і арифметику з фіксованою комою досліджено періодичність реалізацій отриманих за допомогою методів Ейлера та Рунге-Кутти четвертого порядку. Показано, що з врахуванням часової складності виконання операцій при програмній і програмно-апаратній реалізації неперервних хаотичних систем доцільно користуватися методом Ейлера.

Ключові слова: хаотична система, мемристорна структура, періодичність, метод Ейлера, метод Рунге-Кутти, хаотична криптографія.

O.V. KRULIKOVSKYI, S.D. HALIUK
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

CYCLICITY OF TIME SERIES GENERATED BY MEMRISTOR BASED CHAOTIC CIRCUIT

In the paper the solutions periodicity of the mathematical model of the memristor chaotic oscillator and expediency of application different methods of high precision numerical solution of differential equations in cryptographic algorithms is studied. Based on Lyapunov exponent theory the dynamic of chaotic system and its dependencies from system parameters is explored. There are several ranges of system parameters where the largest Lyapunov exponent is greater zero and memeristor system has chaotic modes. The transition from continuous system to discretized model is discussed. Using probability density and atractors it is shown saving of properties of chaotic regimes for different methods of numerical modelling. The periodicity of timeseries obtained by Euler and Runge-Kutta methods is studied by Simulink-model of chaotic systems and fixed-point arithmetic. For timeseries of discrete chaotic system the average period is computed. When timestep is equal $\Delta t = 0,0005 - 0,02$ *and fixed-point arithmetic Q8.16 average period is about* $10^6 \div 2*10^6$ *iterations. If discrete-time series save the original chaotic modes of continuous system, then average period do not depend from timestep of discrete model and computation complexity. It is shown that taking into consideration the complexity of computation for hardware implementation of continuous chaotic systems is advisable to use the Euler method. If timestep close to precision of computation, after several tens iterations collapse of chaos of discrete-time systems is appear with a one-step length period.*

Keywords: chaotic system, memristor system, periodicity, Euler method, Runge-Kutta method, cryptography.

Вступ

Починаючи із другої половини 80-х років XX ст. детерміновані динамічні системи є актуальним напрямом наукових досліджень [1–5] в системах технічного захисту інформації. Хаотичні системи неперервного часу реалізовуються на базі аналогових схем, при цьому спектральні і статистичні характеристики сигналів визначатимуться параметрами схеми (номіналами лінійних і нелінійних елементів). Для побудови системи зв'язку необхідно використовувати два ідентичних генератори. Однак внаслідок впливу теплових шумів та технологічних обмежень на прецизійність елементів електричних кіл виникає проблема встановлення стійкої завадозахищеної синхронізації. Синхронізація таких генераторів може бути досягнута тільки тоді, коли вони будуть близькими за значенням параметрів розкид яких не повинен перевищувати 1 %. Реалізація ідентичних генераторів можлива в інтегральному виконані з лазерною підгонкою на інтегральній мікросхемі [6]. При виході з ладу одного з генераторів заміні підлягатимуть обидва.

Технологічна складність забезпечення ідентичності рознесених генераторів хаосу обмежує їх застосування в системах зв'язку. Одним із шляхів вирішення проблеми забезпечення прецизійності елементної бази є програмно-апаратна реалізація генераторів хаотичних коливань з використанням ПЛІС (програмованих логічних інтегральних схем). Однак перехід до скінченої множини дискретних станів призводить до деградації динаміки і циклічності отриманих чисельними методами хаотичних рядів [7]. При переході від неперервної до дискретної моделі розв'язки системи зберігатимуть властивості фазового простору, розмірності, ергодичності, спектру та ін., проте будуть циклічними. В [8] показано, що довжина циклів значно менша потужності множини можливих станів системи і залежить від кореляційної розмірності та точності обчислень. Різні початкові умови призводять до однакових циклів, що обмежує їх кількість. Для окремих систем можливе явище колапсу хаосу, яке полягає у встановленні циклу періодом в одну ітерацію [9].

В [10, 11] запропоновано методи генерування псевдовипадкових послідовностей на базі математичних моделей хаотичних систем із неперервним часом. Однак в даних роботах питання періодичності розв'язків та їх залежність від обраного чисельного методу інтегрування та точності обчислень не розглядається, хоча є важливим при побудові криптографічних методів захисту інформації.

Метою роботи є аналіз періодичності розв'язків математичної моделі хаотичної системи на базі мемристора [12, 13], використання якого забезпечує просту структуру електричного кола, що демонструє складну динаміку при заданих параметрах. Для досліджень обрано чисельні методи Ейлера та Рунге-Кутти 4-го порядку.

Опис математичної моделі

Мемристор є одним з останніх досягнень розробки та виготовлення нелінійних елементів з використанням інтегральної технології і може бути виготовлений з використанням органічних та

неорганічних матеріалів. Нелінійна динаміка мемристора може бути використана для реалізації малопотужних захищених систем зв'язку. Один з найпростіших генераторів хаотичних коливань на базі мемристора описаний в роботі в [13]. Схема складається з трьох послідовно з'єднаних елементів: індуктивності, конденсатора та мемристорного елемента (рис. 1).

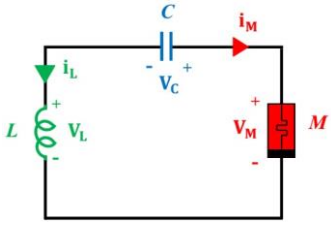


Рис. 1. Електрична схема хаотичної системи на базі мемристора

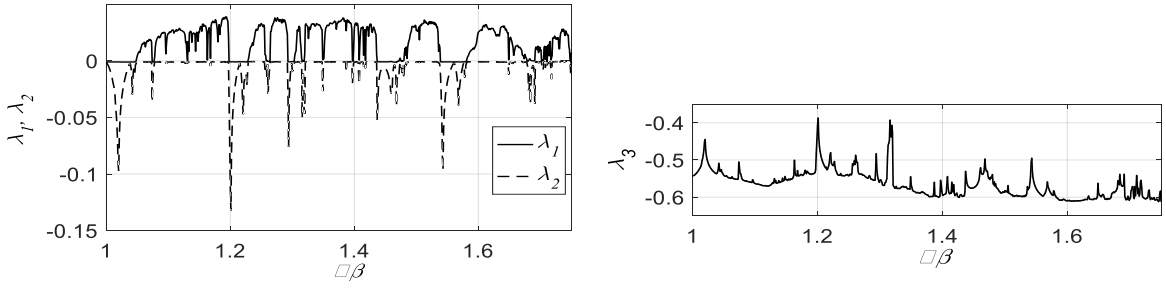
Використана нами модель мемристора є моделлю узагальненого мемристорного пристрою [14] характеристики якого не відповідають характеристикам ідеального мемристора введеного в [15]. Нелінійна характеристика мемристора описується рівнянням:

$$\begin{cases} V_M = \beta(x^2-1)i_M \\ \dot{x} = i_M - \alpha x - i_M x \end{cases} \tag{1}$$

Динаміка електричного кола (рис. 1) описується системою диференційних рівнянь [4]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y/C, \\ \dot{y} = -1/L\left[x + \beta(z^2-1)y\right], \\ \dot{z} = -y - \alpha z + yz, \end{cases} \tag{2}$$

де значення параметрів для хаотичного режиму $C = 1$ *Ф*, $L = 3$ *Гн*. Критерієм хаотичної поведінки є **додатне** значення старшого показника Ляпунова. Визначена за допомогою методу Бенеттина, діаграма показників Ляпунова для системи (2) наведена на рис 2. При значеннях параметру $\beta \in [1,1,7]$ в системі мають місце періодичні $(\lambda_1 = 0)$ і хаотичні $(\lambda_1 > 0)$ режими.



а *б*

Рис. 2. Залежність показників Ляпунова від параметру *β* при *α* = 0,6

Дослідження проводилися для значень параметрів $\beta = 1,5$ та $\alpha = 0,6$. При $\beta = 1,5, L = 3Гн, \alpha = 0,6$ з рис. 2*а*. випливає, що система характеризується хаотичною поведінкою, оскільки найбільший показник Ляпунова є додатнім, а сума показників є від'ємною.

Моделювання розв'язків

Розв'язки чисельними методами диференційних рівнянь відрізняються ступенем їх наближення до точних розв'язків системи. Розв'язки отримані при моделюванні хаотичних систем з врахуванням їх чутливості до як завгодно малих відхилень початкових умов на великих проміжках часу значно відрізняються від точних розв'язків. Метою моделювання нелінійної системи є отримання реалізацій, що зберігають статистичні властивості ідеальних систем. Більшість хаотичних систем є ергодичними, тому їх дослідження можна проводити на основі однієї реалізації. Проте розв'язки, отримані методом чисельного моделювання, повинні зберігати поведінку хаотичного атрактора.

Суть чисельних методів полягає у представленні системи диференційних рівнянь у вигляді рекурентної залежності та розрахунку послідовності точок на траєкторії у дискретні моменти часу з кроком Δt. Найбільш простим за обчислювальною складністю є метод Ейлера, в якому зв'язок між сусідніми точками траєкторій системи (2) описується наступною залежністю

$$\begin{cases} x_{n+1} = f_1(t_n, y_n)\Delta t + x_n, \\ y_{n+1} = f_2(t_n, x_n, y_n, z_n)\Delta t + y_n, \\ z_{n+1} = f_3(t_n, y_n, z_n)\Delta t + z_n, \end{cases} \tag{3}$$

де

$$\begin{cases} f_1 = \dfrac{y_n}{C}, \\ f_2 = -\dfrac{1}{L}\left[x_n + \beta(z_n^2 - 1)y_n\right], \\ f_3 = -y_n - \alpha z_n + y_n z_n. \end{cases} \quad (4)$$

Широкого застосування набув метод Рунге-Кутти четвертого порядку, що характеризується вищою точністю розрахунків. Згідно з цим методом залежність між станами системи у послідовні дискретні моменти часу є наступною:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \dfrac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \\ y_{n+1} = y_n + \dfrac{1}{6}(m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4), \\ z_{n+1} = z_n + \dfrac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4), \end{cases} \quad (5)$$

де

$$k_1 = f_1(t_n, y_n)\Delta t,\ m_1 = f_2(t_n, x_n, y_n, z_n)\Delta t, l_1 = f_3(t_n, y_n, z_n)\Delta t,$$

$$k_2 = f_1(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{m_1}{2})\Delta t,\ m_2 = f_2(t_n + \frac{\Delta t}{2}, x_n + \frac{k_1}{2}, y_n + \frac{m_1}{2}, z_n + \frac{l_1}{2})\Delta t,$$

$$l_2 = f_3(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{m_1}{2}, z_n + \frac{l_1}{2})\Delta t,$$

$$k_3 = f_1(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{m_2}{2})\Delta t,\ m_3 = f_2(t_n + \frac{\Delta t}{2}, x_n + \frac{k_2}{2}, y_n + \frac{m_2}{2}, z_n + \frac{l_2}{2})\Delta t,$$

$$l_3 = f_3(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{m_2}{2}, z_n + \frac{l_2}{2})\Delta t,$$

$$k_4 = f_1(t_n + \Delta t, y_n + m_3)\Delta t,\ m_4 = f_2(t_n + \Delta t, x_n + k_3, y_n + m_3, z_n + l_3)\Delta t,$$

$$l_4 = f_3(t_n + \Delta t, y_n + m_3, z_n + l_3)\Delta t.$$

Значення функцій f_1, f_2, f_3 розраховуються згідно з (4). Приклади портретів фазових атракторів, отриманих під час застосування методу Ейлера та Рунге-Кутти, наведені на рис. 3.

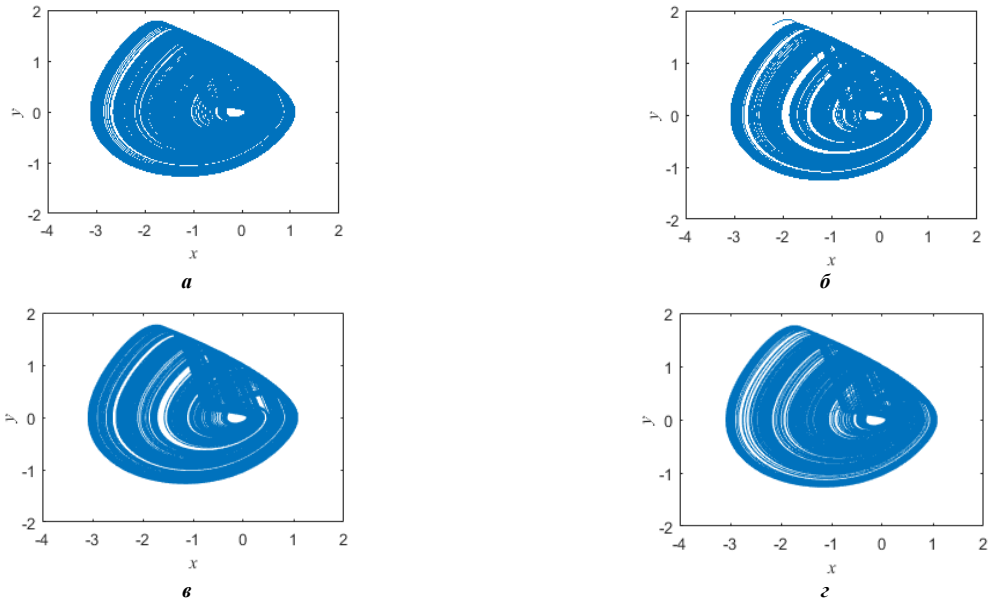


Рис. 3. Хаотичний атрактор системи (2) при $\Delta t = 0,001$ розрахунку методом Ейлера – *а, в*; Рунге-Кутти четвертого порядку – *б, г*. Рис. *а* і *б* отримані з використанням арифметики Q8.16, а *в* і *г* – з використанням арифметики Q8.24

Всі атрактори зберігають форму, характеризуються однаковою структурою з однаковим розмахом реалізацій незалежно від точності розрахунків.

Гістограми розподілу змінної *x* для різної точності та методів розрахунку є подібними (рис. 4), що вказує на збереження фрактальних розмірностей системи.

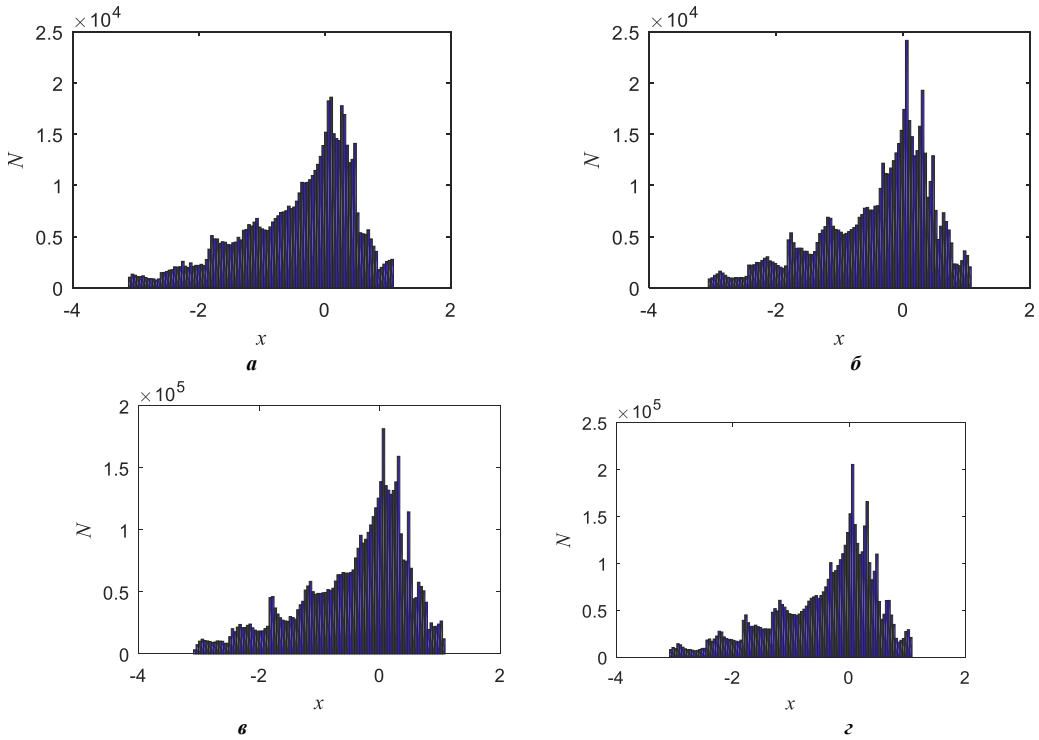


Рис. 4. Гістограми розподілу реалізацій змінної *x* системи (2) при $\Delta t = 0,001$ розрахунку методом Ейлера – *а, в*; Рунге-Кутти четвертого порядку – *б, г*. Рис. *а* і *б* отримані для арифметики Q8.16, *в* і *г* – для арифметики Q8.24

З аналізу залежностей, представлених на рис. 3 і рис. 4, слідує висновок про однакову результативність застосування методів Ейлера та Рунге-Кутти з метою збереження псевдохаотичних характеристик розв'язками дискретизованої системи. Обидва методи дають змогу отримувати хаотичні ряди, які зберігають властивості сигналів оригінальної недискретизованої системи (2).

Періодичність та колапс

Для проведення дослідження розроблено Simulink-моделі системи (2), що реалізують методи Ейлера та Рунге-Кутти четвертого порядку. Всі розрахунки здійснено в арифметиці з фіксованою комою Q8.16 з точністю 24 біта, з яких 16 біт відведено на дробову частину. Приклад реалізації (2) за допомогою методу Ейлера наведено на рис. 5. У схемі використано стандартні засоби Simulink, операція інтегрування здійснюється блоками "Discrete-Time integrator". Під час розрахунків проводилося заокруглення до меншого значення.

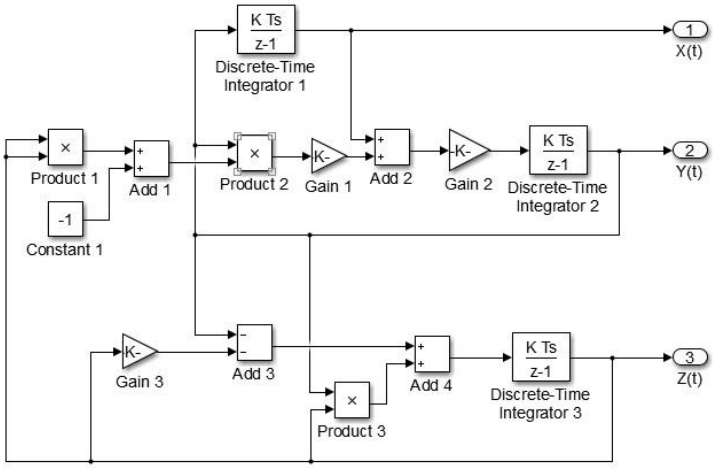


Рис. 5. Simulink-модель хаотичної системи для розрахунків методом Ейлера

Для 25 значень випадкових початкових умов та 25 значень параметрів системи в околі $\beta = 1,5$ та $\alpha = 0,6$ залежність середнього періоду, що встановлюється внаслідок деградації хаотичної системи, від кроку по часу наведено на рис. 6.

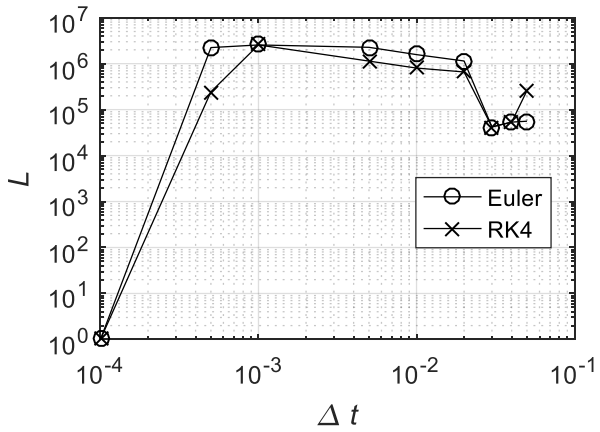


Рис. 6. Залежність середнього періоду від кроку по часу для методу Ейлера та Рунге-Кутти четвертого порядку

З рис. 6. випливає, що збільшення складності розрахунків не призводить до збільшення тривалості періоду повторення реалізацій системи. Середня тривалість циклу знаходиться в межах $10^6 \div 2 \cdot 10^6$ ітерацій і не залежить від кроку дискретизації при $\Delta t = 0,0005 \div 0,02$. При Δt = 0,0001 для обох методів розрахунку спостерігається колапс, обумовлений втратою точності розрахунків внаслідок заокруглення чисел. Після перехідного процесу тривалістю в кілька десятків ітерацій, в системі встановлюється цикл довжиною одну ітерацію (рис. 7).

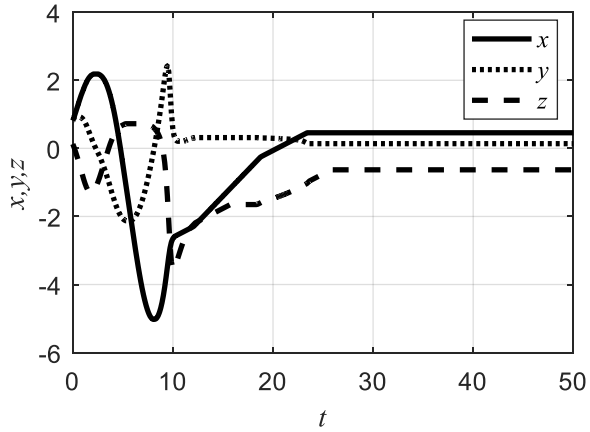


Рис. 7. Колапс хаотичної системи при Δ*t* = 0,0001

У випадку зростання інтервалу дискретизації, при $\Delta t \geq 0,03$ середнє значення періоду повторення зменшується до $\sim 5 \cdot 10^4$, що може бути обумовлено зміною структури системи внаслідок лінеаризації на великому проміжку часу.

Висновки

В роботі за допомогою чисельних методів Ейлера та Рунге-Кутти досліджено математичну модель електричного кола з хаотичною поведінкою з використанням арифметики з фіксованою комою. Проведено порівняльний аналіз ефективності чисельних методів розв'язку нелінійних диференційних рівнянь, що описують хаотичні системи. Показано, що застосування методу Рунги-Кутти не призводить до збільшення періоду повторення псевдохаотичних рядів. Встановлено, що для побудови генераторів псевдовипадкових послідовностей достатньо використовувати прості методи рішення диференційних рівнянь, зокрема, метод Ейлера.

Література

1. Pecora L. M. Synchronization in chaotic systems / L. M. Pecora, T.L. Carroll // Phys. Rev. Lett. – 1990. – Vol. 64. № 8. – P. 821–824.

2. Птицын Н. Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии / Н. Птицын. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 80 с.

3. Kocarev L. Chaos-Based Cryptography Theory, Algorithms and Applications / Ljupco Kocarev, S. Lian. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 397 p.

4. Галюк С.Д. Порівняльний аналіз двомірних відображень для перестановок пікселів / С.Д. Галюк, О.В. Круліковський, Л.Ф. Політанський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1(245). – С. 214–220.

5. Krulikovskyi O.V. PRNG based on modified tratas chaotic system / O.V. Krulikovskyi, S.D. Haliuk, L.F. Politanskyi // Сучасний захист інформації. – 2016. – № 2. – С. 69–77.

6. Keuninckx L. Encryption key distribution via chaos synchronization / Keuninckx Lars, Soriano Miguel C., Fischer Ingo, Mirasso Claudio R., Nguimdo Romain M., Van der Sande Guy // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7.

7. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний / Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин. – Москва : Галилеос АРВ, 2007. – 247 с.

8. Bernard H. Probability Distributions Related to Random Mappings / Bernard Harris // Ann. Math. Statist. – 1960. – Volume 31, Number 4. – P. 1045–1062.

9. Yuan G. Collapsing of chaos in one dimensional maps / G. Yuan, J. A. Yorke // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2000. – № 136. – P. 18–30.

10. Mansingka A.S. Fully digital jerk-based chaotic oscillators for high throughput pseudo-random number generators up to 8.77 Gbits/s / A.S. Mansingka, M. Affan Zidan, M.L. Barakat, A.G. Radwan, K.N. Salama // Microelectron. Jour. –2013. – Vol. 44, Issue 9. – P. 744–752.

11. Lahcene Merah A Pseudo Random Number Generator Based on the Chaotic System of Chua's Circuit, and its Real Time FPGA Implementation / Lahcene Merah, Adda Ali-Pacha, Naima Hadj Said, Mustafa Mamat // Applied Mathematical Scien. – 2013. – Vol. 7, no. 55. – P. 2719–2734.

12. Corinto F. Memristor-based chaotic circuit for pseudo-random sequence generators / Fernando Corinto, Oleh V. Krulikovskyi, Serhii D. Haliuk // 18th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, 18–20 April 2016, IEEE.

13. Muthuswamy B. Simplest chaotic circuit / Bharathwaj Muthuswamy, Leon O. Chua // Int. J. of Bif. and Chaos. – 2010. – Vol. 20, № 5. – P. 1567–1580.

14. Chua L.O. Memristive devices and systems / L.O. Chua, S.M. Kang // Proc. IEEE. – 1976. – № 64. – P. 209–223.

15. Chua L.O. Memristor – The missing circuit element / Chua L.O. // IEEE Trans. Circuit Th. – 1971. – CT–18. – P. 507–519.

References

1. Pecora L. M. Synchronization in chaotic systems / L. M. Pecora, T.L. Carroll // Phys. Rev. Lett. – 1990. – Vol. 64. № 8. – P. 821–824.

2. Pticyn N. Prilozhenie teorii determinirovannogo haosa v kriptografii / N. Pticyn. – Moskva : MGTU im. N. E. Baumana, 2002. – 80 s.

3. Kocarev L. Chaos-Based Cryptography Theory, Algorithms and Applications / Ljupco Kocarev, S. Lian. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 397 p.

4. Haliuk S.D. Porivnialnyi analiz dvomirnykh vidobrazhen dlia perestanovok pikseliv / S.D. Haliuk, O.V. Krulikovskyi, L.F. Politanskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – № 1(245). – C. 214–220.

5. Krulikovskyi O.V. PRNG based on modified tratas chaotic system / O.V. Krulikovskyi, S.D. Haliuk, L.F. Politanskyi // Cuchasnyi zakhyst informatsii. – 2016. – № 2. – C. 69–77.

6. Keuninckx L. Encryption key distribution via chaos synchronization / Keuninckx Lars, Soriano Miguel C., Fischer Ingo, Mirasso Claudio R., Nguimdo Romain M., Van der Sande Guy // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7.

7. Shahtarin B.I. Generatory haoticheskih kolebanij / B.I. Shahtarin, P.I. Kobylkina, Yu.A. Sidorkina, A.V. Kondratev, S.V. Mitin. – Moskva : Galileos ARV, 2007. – 247 s.

8. Bernard H. Probability Distributions Related to Random Mappings / Bernard Harris // Ann. Math. Statist. – 1960. – Volume 31, Number 4. – R. 1045–1062.

9. Yuan G. Collapsing of chaos in one dimensional maps / G. Yuan, J. A. Yorke // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2000. – № 136. – R. 18–30.

10. Mansingka A.S. Fully digital jerk-based chaotic oscillators for high throughput pseudo-random number generators up to 8.77 Gbits/s / A.S. Mansingka, M. Affan Zidan, M.L. Barakat, A.G. Radwan, K.N. Salama // Microelectron. Jour. –2013. – Vol. 44, Issue 9. – R. 744–752.

11. Lahcene Merah A Pseudo Random Number Generator Based on the Chaotic System of Chua's Circuit, and its Real Time FPGA Implementation / Lahcene Merah, Adda Ali-Pacha, Naima Hadj Said, Mustafa Mamat // Applied Mathematical Scien. – 2013. – Vol. 7, no. 55. – R. 2719–2734.

12. Corinto F. Memristor-based chaotic circuit for pseudo-random sequence generators / Fernando Corinto, Oleh V. Krulikovskyi, Serhii D. Haliuk // 18th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, 18–20 April 2016, IEEE.

13. Muthuswamy B. Simplest chaotic circuit / Bharathwaj Muthuswamy, Leon O. Chua // Int. J. of Bif. and Chaos. – 2010. – Vol. 20, № 5. – R. 1567–1580.

14. Chua L.O. Memristive devices and systems / L.O. Chua, S.M. Kang // Proc. IEEE. – 1976. – № 64. – R. 209–223.

15. Chua L.O. Memristor – The missing circuit element / Chua L.O. // IEEE Trans. Circuit Th. – 1971. – CT–18. – R. 507–519.

Рецензія/Peer review : 24.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д. ф.-м. н., проф. Сльотов М.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-116-119
УДК 621.121

Н.І. ПРАВОРСЬКА
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В статті розглядається питання створення активного датчику мережі «Інтернет речей». Інтернет речей представляє собою активну мережу, що складається з простих датчиків, вузлів підключення до мережі Інтернет та серверної частини. Програмне забезпечення датчиків створюється з використанням високих мов програмування, таких як C/C++. Простота створення ПО датчика дозволяє легко імплементувати його в 8-бітні контролери за необхідності досягнення простоти керування. Легкість доступу до WiFi надає можливість швидкого розгортання мережі.

Ключові слова: датчик, сервер, Інтернет речей.

N.I. PRAVORSKA
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF MODEL OF ELEMENTS OF THE INTERNET OF THINGS IS FOR CONTROL OF PARAMETERS OF ENVIRONMENT

In the article the question of creation active to the sensor of network is examined the Internet of things. The internet of things is an active network that consists of simple sensors, connecting knots to the network the internet and server side. Main purposes of IoT sensors are gathering different kind of information. Sensors do this accurately by requests from server or by interval.

Article deal with IoT sensor of humidity and temperature. Software of sensors is created with the use of high as if programming, such as C/C++. Simplicity of creation sensor' software allows easily implement it into 8-bit controller. This allows achieve necessity level of management simplicity. Lightness of access to Wi-Fi gives possibility of rapid network development.

Keywords: sensor, server, internet of things.

Вступ

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це міжмережева взаємодія фізичних пристроїв, транспортних засобів (що також називаються "підключеними пристроями" або "розумними пристроями"), будівель й інших предметів, забезпечених електронікою, програмним забезпеченням, датчиками, актуаторами і мережевим підключенням, які дозволяють цим об'єктам збирати і обмінюватися даними. У 2013 році Світова ініціатива стандартизації Інтернету речей (Global Standards Initiative on Internet of Things, IoT – GSI) визначила Інтернет речей як "інфраструктуру інформаційного суспільства". Інтернет речей дозволяє пристроям бути виявленим або контрольованим видалено через існуючу мережеву інфраструктуру, створюючи можливості для прямої інтеграції фізичного світу в комп'ютерну систему, в результаті підвищуючи ефективність, точність, економічну вигоду на додаток до скорочення втручання людини. Коли Інтернет речей доповнюється датчиками і виконавчими механізмами, ця технологія стає базою для загальніших кібер-физических систем, які також охоплюють такі технології, як розумні мережі, розумні будинки, розумний транспорт і розумні міста. Кожна річ унікально ідентифікується через вбудовану обчислювальну систему, але здатна взаємодіяти з існуючою інфраструктурою інтернету. За оцінками експертів, до 2020 року в Інтернет речей буде включено майже 50 мільярдів об'єктів [1].

Сам термін "Інтернет речей" був придуманий Пітером Т. Люісом у 1985 р. під час сесії Федеральної комісії із зв'язку США (FCC), що підтримує безпровідний зв'язок на 15-й Законодавчій конференції конгресу "Чорний конгрес". У своїй промові він заявив, що "Інтернет речей – це інтеграція людей, процесів і технологій з пристроями, що підключаються, і датчиками для забезпечення видаленого моніторингу, стану, маніпулювання і оцінки тенденцій таких пристроїв".

Основна частина

Згідно із звітом компанії Gartner Inc. до 2020 року Інтернет речей складатиметься з приблизно 20.8 мільярдів пристроїв. Інтеграція з мережею Інтернет має на увазі, що пристрої повинні мати унікальні ідентифікатори, якими є IP-адреса. Проте, у зв'язку з обмеженістю пулу адрес IPv4 (4.3 мільярдів унікальних адрес), об'єкти в мережі «Інтернет речей» повинні використати IPv6 для розміщення надзвичайно величезного адресного простору. Ці об'єкти представляють не лише пристрої з сенсорними можливостями, але і активації (замки, контрольовані через інтернет), що забезпечують можливість. Для подальшого росту майбутнє Інтернету речей не представляється можливим без підтримки IPv6; і, отже, глобальне впровадження IPv6 найближчими роками матиме вирішальне значення для успішного розвитку Інтернету речей в майбутньому.

Окрім домашнього управління енергією, Інтернет речей особливо актуальний для SmartGrid, оскільки він надає системи збору і обробки інформації про енергію і потужність в автоматичному режимі з метою підвищення ефективності, надійності, стійкості і економічності розподілу і виробництва електроенергії. Використання облаштувань розширеної вимірювальної інфраструктури (AMI), підключених до інтернету, облаштування електропостачання можуть не лише збирати інформацію від кінцевих споживачів, але і управляти іншими облаштуваннями автоматизації розподілу, такими як трансформаторами і АПВ (автоматичне повторне включення).

Існують декілька запланованих або таких, що проводяться нині широкомасштабних розгортань Інтернету речей, щоб забезпечити краще управління містом і міськими системами. Наприклад, місто Сонгдо, що в Південній Кореї, перший у своєму роді повністю обладнане і підключене в єдину мережу розумне місто, яке практично збудовано. Практично кожен елемент цього міста планується підключити, з'єднати і перетворити на постійний потік даних, які спостерігатимуться і аналізуватимуться безліччю комп'ютерів, з нульовим або невеликим втручанням людини.

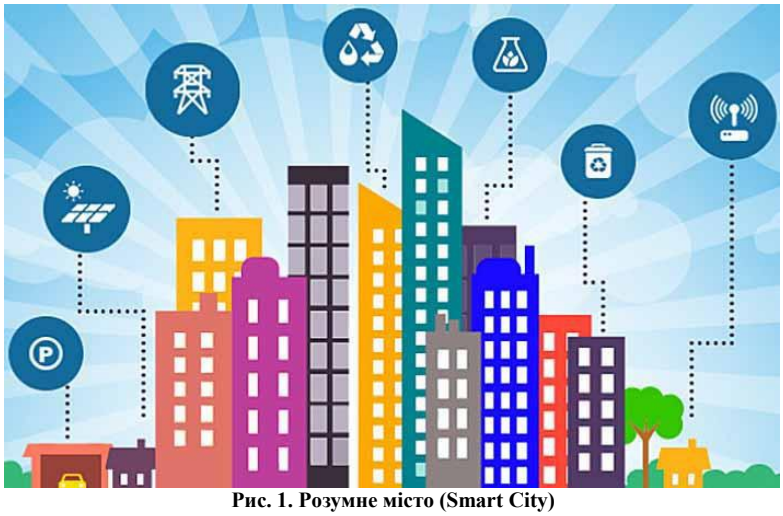


Рис. 1. Розумне місто (Smart City)

Мережева архітектура

Інтернет речей вимагає величезної масштабованості в мережевому просторі для обробки швидкорослої кількості пристроїв. Стандарт 6LoWPAN використовуватиметься для підключення пристроїв до IP-мереж. З мільярдами пристроїв, що додаються в мережевий простір, IPv6 відіграватиме важливу роль в обробці масштабованості мережевого рівня. Протокол обмежених застосувань, MQTT і ZeroMQ забезпечать легке перенесення даних. Туманні обчислення (Fog computing) є реальною альтернативою запобіганню такому великому потоку даних, що надходить через інтернет. Обчислювальна потужність граничних мережевих пристроїв (маршрутизатори, комутатори) можуть використовуватися для аналізу і обробки даних, що забезпечує простоту масштабування в режимі реального часу.

Реалізація концепції "розумного датчику"

Для вирішення проблеми впровадження IoT можуть бути використані різні способи. Але оптимальним рішенням є устаткування житла датчиками "розумного" будинку. Для ефективної роботи, згідно з рис. 1, потрібні лише декілька типів датчиків: датчик рівня води, датчик вологості, освітлення, вимірювання інших величин. Для організації спільної роботи набору датчиків потрібний контролер, який збиратиме і оброблятиме інформацію, а також пересилати її, припустимо, мобільний телефон користувача для інформування про проблему. Можливе додаткове підключення до системи кульових електрокранів або насосів.

У якості такого контролера використовуються будь-які процесорні засоби, наприклад 8-, 16- та 32-бітні контролери. Обсяг пам’яті, обсяг даних визначається типом даних. Розглянемо реалізацію найбільш простого варіанту елемента IoT – датчика вологості та температури. У якості доступу до мережі використаємо найбільш популярний спосіб – доступ до бездротової мережі WiFi. Для створення прототипів таких датчиків широке застосування знайшли мікроконтролери фірми «Microchip» серії ATMEGA в результаті злиття з компанією «Atmel».

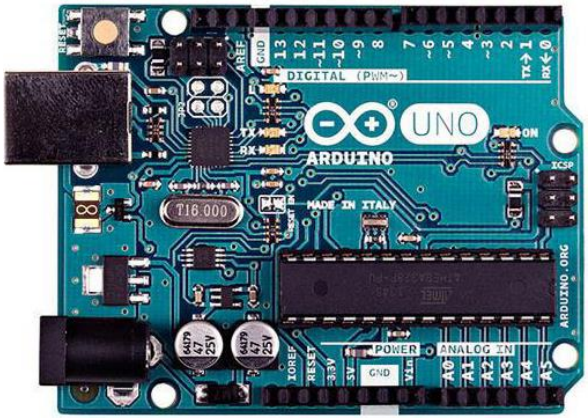


Рис. 2. Контроллер Arduino Uno R3

Для швидкого створення проектів керування використовується середовище Arduino. Arduino – це проект з відкритим початковим кодом, компанія, що створює апаратне і програмне забезпечення. Найчастіше, мікроконтролери програмуються з використанням функцій мов C і C++. На додаток до використання традиційних інструментальних засобів компіляції, проект Arduino надає інтегроване середовище розробки (IDE), засноване на мові Processing [6]. Програми, написані в IDE для Arduino, називаються нарисами або скетчами. Arduino IDE підтримує мови C і C++, використовуючи спеціальні правила структуризації. У Arduino IDE вбудована бібліотека з проекту Wiring, що надає доступ до безлічі простих процедур вводу/виводу. Код, написаний користувачем, може містити всього 2 базових функції, для запуску нарису і основного циклу програми, які компілюються і зв'язуються з функцією-заглушкою main() у виконувану циклічну програму за допомогою GNU toolchain, також включеною в дистрибутив IDE.

Програмна частина

Створення програмного коду визначає необхідність взаємодії 2-х частин:

1) серверної – для обробки, зберігання та прийняття рішень щодо взаємодії з виконавчими вузлами;
2) клієнтської – для накопичення, передачі на сервер та виконання отриманих з сервера команд.

Розглянемо створення такого коду для елементарного датчику температури та вологості з доступом в інтернет.

Структурна схема показана на рис. 3.

Рис. 3. Структурна схема датчика погоди

У якості датчика температури використано датчик DHT11, у якості модуля доступу до мережі – ESP8266. Розглянемо найбільш типові функції, що використовуються для зчитування

```
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2 // Контакт підключення модуля DHT11 до контролера
DHT dht(DHTPIN, DHT11);
float D_t, D_h;
void Weather_Setup() {
       dht.begin();
}
void Weather_Get() {
       D_h = dht.readHumidity(); // вологість
       D_t = dht.readTemperature(); // температура
}
```

Рис. 4. Фрагмент коду ініціалізації датчика та коду зчитування параметрів

На рис. 4. показано простий код, що дозволяє занести значення вологості та температури у пам’ять контролера. Частота викликів може бути встановлена в програмі контролера, наприклад, зчитування кожні 5 хвилин або кожні 10 секунд стану навколо датчику.

Модуль ESP8266 забезпечує підключення до мережі з використанням простого послідовного інтерфейсу керування. На рис. 5 показано фрагмент коду щодо встановлення такого з’єднання.

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial wifiSerial(2, 3); // RX, TX сигнали

void setup() {
  wifiSerial.begin(9600);
  wifiSerial.setTimeout(5000);
  Serial.begin(9600);
  wifiCmd("AT+RST", 1000, "Ready"); //повідомлення про готовність

  boolean connected = false;            //підключення до мережі
  for(int i=0; i<5; i++) {
    if(connectWiFi()) {                 // перевірка підключення із
      connected = true;                 // заданими параметрами
      break;
    }
  }
  while (!connected);
  delay(5000);
```

Рис. 5. Встановлення з’єднання з модулем ESP8266

Підключення до довільного вузла WiFi мережі реалізовано за допомогою командами AT запиту "AT+CWJAP=" (рис. 6).

```
boolean connectWiFi() {
  wifiCmd("AT+CWMODE=1",1000,"OK");
  wifiCmd("AT+CWJAP=\"Network\",\"Password\"",2000,"OK");
  return true;
}
```

Рис. 6. Підключення до довільного вузла WiFi мережі

І довершується підключення вже запитом до відповідного серверу у форматі GET запиту (рис. 7). На сервері має бути підготовлено відповідний файл скрипта, що написано на одній з мов взаємодії (рис. 8).

```
  //устанавливаем режим соединения SINGLE
  wifiCmd("AT+CIPMUX=0", 1000, "OK");
}

boolean  wifiRqst() {
url = "/weather.php?Temp="+(String)D_t+"&Press="+(String)D_h();
WiFi.begin("name", "pass");
  Serial.print("GET "+url+" HTTP/1.1");
  Serial.print("Host: <a href="http://server.ua" >server.ua"</a>);
  Serial.print("User-Agent: WeatherWiFi/1.1");
  Serial.print("Connection: close");
  Serial.print("\n");
```

Рис. 7. Передача значень GET запитом

```
<?PHP
include ('config.php');
$db = @mysql_connect($db_loc,$db_user,$db_pass);
@mysql_select_db($db_name,$db);
mysql_query("SET TIME_ZONE='+3:00'");
$a=$_GET["Temp"];
$b=$_GET["Press"];
mysql_query("INSERT INTO bmp280 (Temp,Press) VALUES ('$a','$b')");
mysql_close($db);
?>
```

Рис. 8. Файл запису отриманих значень на стороні сервера ("weather.php")

Висновки

Швидкість впровадження, одночасно з масовістю, доступністю складових частин, а також зручність IDE для створення програмного коду дозволяють досягти зручності в виконанні задач розвитку вузлів Інтернету речей.

Література

1. Internet of Things. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things (дата обращения 16.03.2017).
2. Privacy of the Internet of Things. URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.03340.pdf (дата обращения 22.04.2017)
3. Arduino. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino (дата обращения 15.03.2017).
4. Современные сетевые технологии, технологии Интернет / Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. URL: http://www.itlab.unn.ru/Uploads/part2.pdf (дата обращения 15.03.2017).
5. Корнелл Гари, Кей С. Хорстманн. Core Java Volume II: Advanced Features, 2004. 1088 с.

References

1. Internet of Things. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things (data obrasheniya 16.03.2017).
2. Privacy of the Internet of Things. URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.03340.pdf (data obrasheniya 22.04.2017)
3. Arduino. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino (data obrasheniya 15.03.2017).
4. Sovremennye setevye tehnologii, tehnologii Internet / Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo. URL: http://www.itlab.unn.ru/Uploads/part2.pdf (data obrasheniya 15.03.2017).
5. Kornell Gari, Kej S. Horstmann. Core Java Volume II: Advanced Features, 2004. 1088 s.

Рецензія/Peer review : 6.9.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-120-124
УДК 004.4

М.С. ГИКАВЧУК, С.С. ПЕТРОВСЬКИЙ, Т.К. СКРИПНИК
Хмельницький національний університет

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ КОНКУРЕНТОЗДАТНОСТІ ВЕБ-ПОРТАЛІВ

В роботі розроблена інформаційна технологія оцінювання конкурентоздатності веб-порталів на основі створення моделей критеріїв оцінки порталів та їх реалізації засобами математичної статистики. Мета дослідження зумовила постановку та розв'язання таких завдань: охарактеризувати основні принципи та правила якісного мережевого інформаційного продукту; проаналізувати міжнародні та національні стандарти щодо методів та методик оцінювання якості сайтів та узагальнити існуючі методи з оцінювання якості веб-порталів; сформувати сукупність чинників, що впливають на процес оцінювання якості веб-порталу та побудувати для них ієрархічну модель класифікації; визначити основні та додаткові критерії оцінювання якості веб-порталі, поділити критерії на класи.

Ключові слова: веб-портал, конкурентоздатність, ієрархічна модель, інтегральна модель.

M.S. HYKAVCHUK, S.S. PETROVSKY, T.K. SKRIPNIK
Khmelnytskyi National University

INFORMATION TECHNOLOGY ANALYSIS COMPETITIVENESS OF WEB PORTAL

The information technology of web portals competitiveness estimation is developed in the work on the basis of creation of models of criteria for portals evaluation and their realization by means of mathematical statistics. The purpose of the study was to set and solve the following tasks: to characterize the basic principles and rules of a quality network information product; to create a set of factors that influence the process of assessing the quality of the web portal and build a hierarchical classification model for them; determine the main and additional criteria for assessing the quality of the web portal, split the criteria into classes. Based on all defined and separate criteria, a hierarchical model of portals quality assessment criteria was constructed. The concept of web portal quality assessment using information models and method of analysis of variance was developed.

Keywords: web portal, competitiveness, hierarchical model, integral model.

Вступ

Сучасні тенденції – розвитку мережі Інтернет ведуть до того, що кожна компанія, яка займається певною діяльністю, має власний – веб-портал, який – розповідає про діяльність компанії, представляє каталог продукції тощо. Зі зростанням кількості компаній, що займаються діяльністю в одній сфері, перед користувачем нерідко постає питання: послугами якої компанії йому краще скористатись, – та не рідко користувач або потенційний клієнт робить вибір на користь тієї компанії, яка має найбільш привабливий веб-портал. Проте, як оцінити привабливість порталу, які критерії оцінки слід використовувати для цього аналізу – питання, яким приділяють увагу велика кількість аналітиків.

Кожен з авторів пропонує свої методи та підходи до такого аналізу. Зважаючи на вище викладене, потрібно провести всебічний – аналіз методів, за допомогою яких можна провести аналіз ефективності роботи сайту за певний період часу та виокремити ті, які є найбільш доцільними та ефективними. Саме цим питанням і буде присвячена дана робота.

Динамічність розвитку сфери веб-розробок породжує потребу в науковому дослідженні якості порталів з метою формування об'єктивних рекомендацій. Якість порталів є інтегральною характеристикою, яка включає широкий спектр властивостей продукту і визначає міру задоволення потреб користувача.

Виклад основного матеріалу

За рейтингами статистичних досліджень різних компаній один портал вважається кращим за інший, якщо на нього зайшло більше відвідувачів. Оцінювати портали за таким критерієм недоцільно, оскільки портали можуть "штучно" підвищувати свою відвідуваність за допомогою спеціальних Інтернет-компаній [3–6], які займаються "розкруткою" порталів. Тому проблема визначення основних критеріїв, за якими можна дати більш адекватну оцінку веб-порталу, залишається не вирішеною.

З огляду на відмінність завдань і методів побудови порталів Web-1 і Web-2, вони мають різні критерії їх оцінювання. На першому рівні від порталу потрібні зовнішня привабливість та інформативність, на другому – прояв зворотного зв'язку, наявність технічних можливостей для аналітичного порівняння (облік кількості відвідувачів, оцінка кількості сторінок, переглянутих ними).

Зарубіжні дослідники намагалися різноманітними шляхами їх порівнювати, врахувавши особливості як етапу Web-1, так і Web-2. Ними накопичений величезний і тривалий у часі досвід проведення порівнянь. Результати їх досліджень у вигляді рекомендацій затребувані суспільством, органами державного управління, бізнесом.

Одним з найбільш авторитетних центрів оцінки порталів є Університет Брауна (Провіденс) [3], США, де цією роботою займається міжнародна команда фахівців під керівництвом відомого фахівця, професора політології Даррелла Веста. Ними щорічно, починаючи з 2001 р., оцінюються портали. Щорічна база для порівняння становить не менше 1800 порталів з 190 країн.

Аналізуючи роботи авторів [7,8], які займаються дослідженнями Інтернету, можна відзначити, що в електронному середовищі існує сформований кластер різних Інтернет-компаній, які займаються розробкою, дизайном, наповненням і розкруткою Інтернет-ресурсів [3–6]. У багатьох випадках портали оцінюються тільки з однієї (технічної) сторони, але проблема полягає в тому, що необхідно сформувати більш повний набір характеристик, на основі яких можна дати оцінку порталу. Характеристикою може бути як їх зміст, так і вдале їх розміщення на веб-сторінці.

Інший підхід до оцінки порталів використовував професор Дж. Стоуерс (Університет Сан-Франциско, США) [3]. Він заснований на якісних і суб'єктивних оцінках, отриманих шляхом виборного телефонного опитування, аналізу користувацьких відгуків, оцінки відвідуваності. Цей підхід включає в оцінку ще і методи результативно-вартісного аналізу (cost-benefit analysis), веб-моніторинг, або стеження спеціальними програмними серверами типу web-tracking, включаючи аналіз лог-файлів і даних сервера. Так, за допомогою web-tracking дослідники отримують наступну інформацію:

– кількість користувачів, їх користь (які сторінки найбільш цікаві), число повторів, середню тривалість часу перебування на сторінці та ін.;

– кількість входів на портал, кількість завантажених документів, число спрямованих електронних листів, завантажених карт, електронних платежів і т. д.;

– вимірювання онлайнової активності;

– оцінка якості сервісів (число доступних порталів, адекватність інформації запитам, навігаційних помилок, відсоток часу, коли портал є недоступним, простота користування для початківців користувачів).

Існуючі підходи оцінки споживчої якості інформаційних порталів базуються на окремих показниках, за майже повної відсутності науково обґрунтованих методів для інтегральної оцінки якості систем, яка враховує усі основні показники. Інформаційним проектам із застосуванням веб-технологій характерна невизначеність (закон розподілу вхідних або вихідних випадкових величин невідомий або немає повної впевненості щодо значень його параметрів). Водночас використання засобів математичної статистики дозволяє адекватно оцінювати параметри якості веб-порталів.

Всі методики, включаючи методику Університету Брауна, розраховують інтегральний показник, отриманий в результаті підсумовування балів (оцінок) за кожним із критеріїв. За цією методикою за кожен з основних критеріїв, який був виявлений дослідником на порталі, давалося 4 бали.

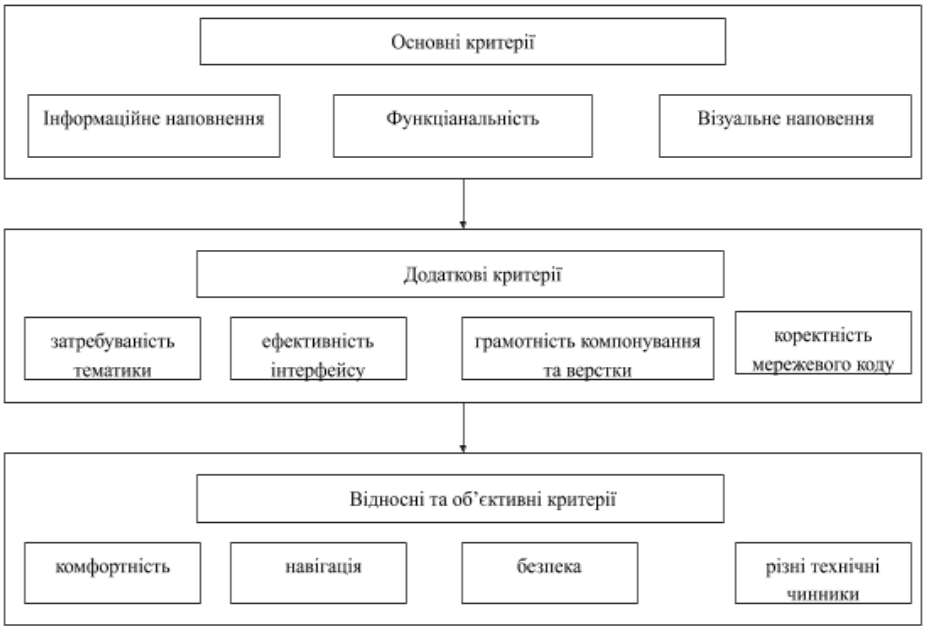


Рис. 1. Ієрархічна модель критеріїв оцінювання

На якість порталу впливає велика кількість показників. Умовно їх є три основні категорії, які характеризують дизайн або візуальне наповнення, функціональність або технічне наповнення та контент або інформаційне наповнення. Додаткові критерії, а саме: затребуваність тематики, єдиний стиль подачі матеріалу, практичність та ефективність інтерфейсу, безпека персональних даних, грамотність компонування та верстки, коректність мережевого коду. Відносні та об'єктивні критерії: критерії, які враховує під час оцінювання якості власник чи розробник порталу (комфортність, навігація, дизайн, контент, безпека та різні технічні чинники); критерії, які впливають на оцінювання сайту користувачем (розмір шрифту, ширина рядка та наявність простору навколо тексту, міжрядкова відстань, колірний контраст). Можливість адаптувати портал для роботи на мобільному пристрої з малим екраном є необхідною умовою якості функціонування веб-порталу та збільшення можливостей користувачів такого веб-продукту.

На основі усіх визначених та відокремлених критеріїв побудовано ієрархічну модель критеріїв оцінювання якості порталів (рис. 1). На основі ієрархічної моделі критеріїв оцінювання якості порталів можна побудувати інтегральну модель якості веб-порталу представлену у вигляді набору п'яти функцій:

$$Q=\{f(D_l), f(K_n), f(U_m), f(RCk_r), f(RCs_p)\}, \quad (1)$$

де D – дизайн або візуальне наповнення; U – функціональність або технічне наповнення; K – контент або інформаційне наповнення веб-порталу; RCk_r – додаткові критерії; RCs_p – відносні та об'єктивні критерії.

Дана інтегральна модель буде повною, якщо будуть враховані вагові коефіцієнти для кожної категорії.

Статистична обробка результатів експерименту дозволяє оцінити за даними поточних вимірів точність застосованого методу дослідження. За статистичними даними всі параметри знаходяться в допустимих межах, що підтверджує правильність вибраного методу дослідження.

Під час побудови статистичних моделей нормальному законові безумовно належить центральне місце. Проте намагання використовувати його для моделювання розподілу емпіричних даних у будь-якому разі не завжди є обґрунтованим. Більш істотно те, що багато методів обробки даних засновано на розрахункових величинах, що мають хоча й інші, але близькі розподіли до нормального розподілу. Крім того, за допомогою нормального закону визначаються широко розповсюджені в математичній статистиці розподіли χ^2 (хі-квадрат), t Стьюдента і F Фішера. Розподіл χ^2 (хі-квадрат) – це розподіл випадкової величини

$$X=X_1^2+X_2^2+\ldots+X_n^2, \quad (2)$$

де X_1^2, X_2^2, ..., X_n^2 – випадкові величини, які є незалежними і мають той самий стандартний нормальний розподіл $N(0, 1)$; n – «число ступенів вільності» розподілу хі-квадрат.

Розподіл t Стьюдента – це розподіл випадкової величини:

$$T = \frac{U\sqrt{n}}{\sqrt{X}}, \quad (3)$$

де U – випадкова незалежна величина і X, що має стандартний нормальний розподіл $N(0, 1)$; X – розподіл хі-квадрат з n ступенями вільності; n – «число ступенів вільності» розподілу Стьюдента.

Розподіл F Фишера – це розподіл випадкової величини:

$$F=\frac{\frac{1}{k_1}X_1}{\frac{1}{k_2}X_2}, \quad (4)$$

де X_1 і X_2 – випадкові незалежні величини, що мають розподіли хі-квадрат з числом ступенів вільності i. Отже, розподіли χ^2 (хі-квадрат), Стьюдента і Б. Фішера є похідними від нормального закону. Розглянемо властивості цих розподілів докладніше.

Розподіл «хі-квадрат» можна отримати за схемою повторних випробувань, якщо з генеральної сукупності нормально розподілених значень з нульовим середнім (μ=0) і одиничним стандартним відхиленням (σ=1) випадковим методом вилучати незалежно n значень, X_2^2, ..., X_n^2, а потім розраховувати суму їх квадратів $(X_1)^2+(X_2)^2+\ldots+(X_n)^2$. У результаті багаторазових випробувань значення цих сум будуть мати розподіл χ^2 (хі-квадрат) з n степенями вільності. Аналітична форма запису щільності розподілу χ^2 має вигляд:

$$f_{x^2}(x,n) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}}\cdot\Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}-1}\cdot e^{-\frac{x}{2}}, \quad (5)$$

де $f_{x^2}(x,n)$ – функція щільності розподілу χ^2; n – число ступенів вільності; Г() – гама-функція.

На рис. 2 показано розрахунки значень і графіки щільності розподілу χ^2 для трьох ступенів вільності (2; 3 15).

	A	B	C	D
1	n =	2	3	5
2	1/Г(n/2) =	1,00	1,13	0,75
3	A =	0,50	0,40	0,13
4	x	Розподіл хі-квадрат		
5	0	0,49751	0,03970	0,00013
6	1	0,30327	0,24197	0,08066
7	2	0,18394	0,20766	0,13837
8	3	0,11157	0,15418	0,15418
9	4	0,06767	0,10798	0,14398
10	5	0,04104	0,07322	0,12204
11	6	0,02489	0,04865	0,09730
12	7	0,01510	0,03187	0,07437
13	8	0,00916	0,02067	0,05511
14	9	0,00555	0,01330	0,03989
15	10	0,00337	0,00850	0,02833

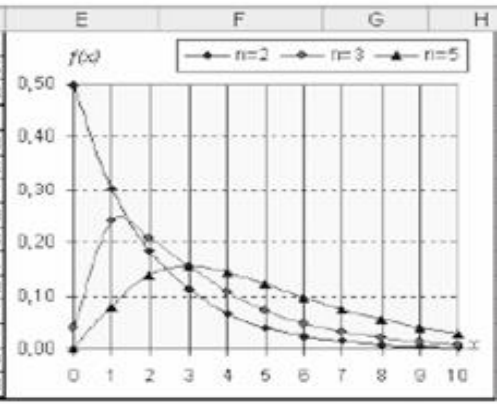


Рис. 2. Розрахунок і графіки щільності розподілу χ^2

У стовпчиках С і Д розраховано значення розподілу для числа ступенів вільності n=3 і n=5.

Як видно з графіків, при збільшенні числа ступенів вільності n розподіл χ^2наближається до нормального розподілу з середнім n і стандартним відхиленням $\sqrt{2n}$. Якщо дисперсію можна записати як суму квадратів n незалежних випадкових значень випробувань $X_1^2, X_2^2, ..., X_n^2$ наприклад,

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1}\left(\sum_{i-1}^{n} X_i^2 - n\underline{X}^2\right) = \frac{1}{n-1}\left(X_1^2 + X_2^2 + \ldots + X_n^2\right) - \frac{nX}{n-1}, \quad (6)$$

то величина s_x^2 може мати розподіл χ^2. Тому природно, що χ^2 розподіли використовують у статистичних висновках щодо дисперсії.

Властивості нормального розподілу можна використовувати лише тоді, коли обсяг вибірки n є «достатньо великим» – на це звертає увагу центральна гранична теорема. Проте в реальних умовах обсяг вибірки, як правило, не є «достатньо великим». У цих умовах використовують інші розподіли. Одним із найважливіших вважається розподіл Стьюдента:

$$f_t(x,n) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\cdot\pi}\cdot\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}\left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}}, \quad (7)$$

де $f_t(x,n)$ – функція щільності розподілу Стьюдента; n – число ступенів вільності; Г() – гама-функція.

На рис. 3. показано розрахунки розподілу Стьюдента для ступенів вільності (1; 2 ;8) і для порівняння відповідні значення нормального розподілу.

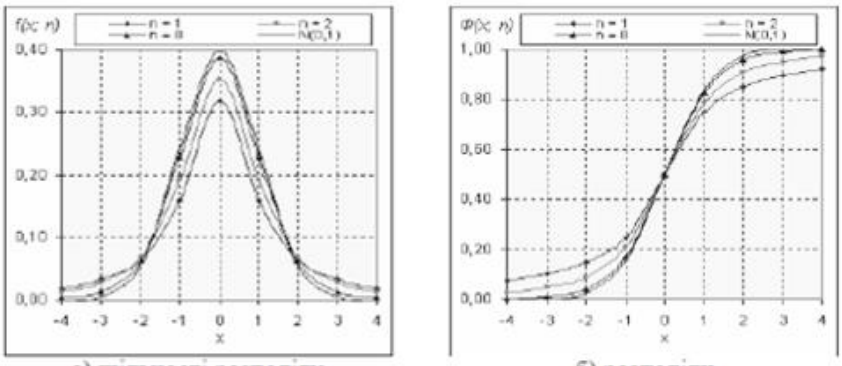
У стовпчиках С і D розраховано значення розподілу Стьюдента для числа ступенів вільності n=2 і n=8. У стовпчику Е – значення щільності нормального розподілу.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	n =	1	2	8		1	2	8	
2	Г((n+1)/2) =	1,00	0,89	11,63					
3	Г(n/2) =	1,77	1,00	6,00					
4	A =	0,32	0,35	0,39					
5		Щільність				Розподіл			
6	x	Стьюдента			НР	Стьюдента			НР
7	-6	0,0086	0,0043	0,0002	0,0000	0,0526	0,0133	0,0002	0,0000
8	-5	0,0122	0,0071	0,0007	0,0000	0,0628	0,0189	0,0005	0,0000
9	-4	0,0187	0,0131	0,0028	0,0001	0,0780	0,0286	0,0020	0,0000
10	-3	0,0318	0,0274	0,0130	0,0044	0,1024	0,0477	0,0085	0,0013
11	-2	0,0637	0,0680	0,0624	0,0540	0,1476	0,0918	0,0403	0,0228
12	-1	0,1592	0,1925	0,2276	0,2420	0,2500	0,2113	0,1733	0,1587
13	0	0,3183	0,3536	0,3867	0,3989	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
14	1	0,1592	0,1925	0,2276	0,2420	0,7500	0,7887	0,8267	0,8413
15	2	0,0637	0,0680	0,0624	0,0540	0,8524	0,9082	0,9597	0,9772
16	3	0,0318	0,0274	0,0130	0,0044	0,8976	0,9523	0,9915	0,9987
17	4	0,0187	0,0131	0,0028	0,0001	0,9220	0,9714	0,9980	1,0000
18	5	0,0122	0,0071	0,0007	0,0000	0,9372	0,9811	0,9995	1,0000
19	6	0,0086	0,0043	0,0002	0,0000	0,9474	0,9867	0,9998	1,0000

Рис. 3. Значення розподілів Стьюдента і розподілу *N*(0, 1)

На рис. 4 показано сімейство графіків розподілу Стьюдента для трьох ступенів вільності (1; 2; 8), а також графік стандартного нормального розподілу N(0, 1).

Як видно, при збільшенні числа ступенів вільності n розподіли Стьюдента асимптотично наближаються до нормального розподілу. Коли обсяг вибірки n стає «достатньо великим», тобто практично $n \to \infty$, розподіли Стьюдента збігаються з нормальним розподілом. Найчастіше розподіли Стьюдента використовують у статистичних висновках щодо середніх.



а) щільності розподілу б) розподіли

Рис. 4. Графіки розподілів Стьюдента і нормального розподілу *N*(0, 1)

Розподіл *F* Фішера можна отримати, використовуючи схему повторних випробувань, коли з генеральної сукупності нормально розподілених значень з параметрами (μ =0 і σ =1) випадковим методом спочатку формують першу змінну X_1 з розподілом «хі-квадрат» і степенями вільності *n*, а потім незалежним шляхом формують другу змінну X_2 з розподілом «хі-квадрат» і степенями вільності *T*. Нова випадкова величина, що має властивості розподілу Фішера, складатиметься з відношення

$$F=\frac{X_1}{n}/\frac{X_2}{m}, \tag{8}$$

Функція щільності розподілу Фішера має вигляд

$$f_F(x,n,m)=\frac{\Gamma\left(\frac{n+m}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\cdot\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)}\left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}}x^{\frac{m}{2}-1}\left(1+\frac{m}{n}x\right)^{-\frac{n+m}{2}}, \tag{9}$$

де $f_F(x,n,m)$ – функція щільності розподілу Фішера; *n* і *m* – число ступенів вільності; Г() – гама-функція.

Висновки

Спираючись на результати досліджень проблеми класифікації веб-порталів, запропоновано класифікацію веб-порталів, проаналізовано основні критерії оцінки їх якості як умови розвитку електронного підприємництва. Розглянуто такі критерії, як функціональність, дизайн, наповнення, технічні характеристики.

В роботі було розроблено концепцію оцінювання якості веб-порталу з використанням інформаційних моделей та методу дисперсійного аналізу, що забезпечило достовірність отриманих результатів. Розроблено методику визначення інтегрального показника якості порталу з врахуванням категорій якості чинників, що забезпечує отримання числових характеристик якості веб-порталу.

Література

1. Пасічник В.В. та ін. Глобальні інформаційні системи та технології: Економічні науки : монографія / Р.Б. Кравець, Д.О. Тарасов. – Львів : Львівська політехніка, 2006. – 348 с.

2. Пілат О. Інформаційна система оцінки якості електронних видань / О. Пілат, І. Огірко // Український ун-тет в Москві. – 2012. – Том 17. – С. 162–166.

3. Пілат О.Ю. Критерії якості мультимедійних технологій / О.Ю. Пілат, І.В. Огірко // Мультимедійні технології в освіті. – 2011. – С. 54.

4. Пасічник Н.Р. Формалізм у постановці задачі створення якісного порталу / Н.Р. Пасічник, М.П. Дивак // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – Вип. 14 (188). – С. 325–329.

5. Огірко І.В. Проблематика стандартизації електронних видань / І.В. Огірко, О.Ю. Пілат // Наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, наук. працівн. і асп., 2–5 лютого 2010 р. : тези доп. – Львів : УАД, 2010. – С. 91.

6. Пілат О.Ю. Становище електронних видань у сучасному медіасвіті з погляду регламентації / О.Ю. Пілат // Комп'ютерні технології друкарства. – 2010. – № 23. – С. 173–182.

7. Літовченко І.Л. Особливості маркетингових досліджень через Інтернет / І.Л. Літовченко, Ю.В. Цуркан // Вісник НУ "Львівська Політехніка", Логістика. – 2004. – С. 79–86.

References

1. Pasichnik V.V. ta in. Globalni informaciïni sistemi ta tehnologiï: Ekonomichni nauki : monografiya / R.B. Kravec, D.O. Tarasov. – Lviv : Lvivska politehnika, 2006. – 348 s.

2. Pilat O. Informaciïna sistema ocinki yakosti elektronnih vidan / O. Pilat, I. Ogirko // Ukraïnskiï un-tet v Moskvi. – 2012. – Tom 17. – S. 162–166.

3. Pilat O.Yu. Kriteriï yakosti multimediïnih tehnologiï / O.Yu. Pilat, I.V. Ogirko // Multimediïni tehnologiï v osviti. – 2011. – S. 54.

4. Pasichnik N.R. Formalizm u postanovci zadachi stvorennya yakisnogo portalu / N.R. Pasichnik, M.P. Divak // Naukovi praci DonNTU. – 2011. – Vip. 14 (188). – S. 325–329.

5. Ogirko I.V. Problematika standartizaciï elektronnih vidan / I.V. Ogirko, O.Yu. Pilat // Nauk.-tehn. konf. prof.-vikl. skladu, nauk. pracivn. i asp., 2–5 lyutogo 2010 r. : tezi dop. – Lviv : UAD, 2010. – S. 91.

6. Pilat O.Yu. Stanovishe elektronnih vidan u suchasnomu mediasviti z poglyadu reglamentaciï / O.Yu. Pilat // Komp'yuterni tehnologiï drukarstva. – 2010. – № 23. – S. 173–182.

7. Litovchenko I.L. Osoblivosti marketingovih doslidzhen cherez Internet / I.L. Litovchenko, Yu.V. Curkan // Visnik NU "Lvivska Politehnika", Logistika. – 2004. – C. 79–86.

Рецензія/Peer review : 16.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-125-130
УДК 62-519

В.І. СТЕЦЮК, В.В. КОВАЛЕНКО
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ОБРОБКИ МОВНИХ КОМАНД СИСТЕМ ГОЛОСОВОГО КЕРУВАННЯ

В роботі сформовані основні задачі систем обробки мовних команд. Здійснена класифікація систем голосового керування. Проведено аналітичний огляд алгоритмів та етапів обробки мовних команд. Розроблено структурну та функціональну схеми електричної системи голосового керування комплексу "Smart home" за бездротовим протоколом передачі даних Z-Wave. Програмно-апаратно реалізована система голосового керування на базі модуля обробки, модуля Z-Wave, модуля візуалізації, модуля реєстрації, модуля живлення і модуля аудіо з відповідними колами комутації та регулювання. Розробка актуальна з огляду на популярність даних систем, а особливо для людей з обмеженими можливостями. Голосове керування в даному випадку розглядається як основний інструмент керування, який вкрай необхідний через відсутність можливості у людей з обмеженими можливостями впливати на звичайні органи керування.

Ключові слова: мовні команди, голосове керування, система, фільтрація, шум, мікроконтролер, мікрокомп'ютер, "розумний будинок".

V.I. STETSIUK, V.V. KOVALENKO
Khmelnytskyi National University

METHODS FOR PROCESSING SPEECH COMMANDS OF VOICE CONTROL SYSTEMS

For a long time, the process of human interaction with software electronic hardware was purely tactile. The invention of the graphical interface has led to the proliferation of personal computers and other gadgets, but people have always sought a more universal and natural way of communication - voice control. Voice control is based on speech recognition technology, which is the processing of speech signals to filter and suppress noise, segmentation into informative areas, determine informative parameters that reflect the unique properties of speech and recognition. Language technologies are a key factor in the development of an automated human environment, ranging from the improvement of working and research processes and ending with the field of personal application of modern technologies. Despite the high speed of development of computers and information technologies, the main problems of voice control systems remain relevant. The main tasks of language command processing systems are formed in the work. Classification of voice control systems. An analytical review of algorithms and stages of processing language commands. Structural and functional diagrams of the electric control systems of the "Smart home" complex over the Z-Wave wireless data communication protocol have been developed. The hardware-based system of voice control is based on the processing module, the Z-Wave module, the visualization module, the registration module, the power module and the audio module with the respective switching and control circuits. The development is relevant in view of the popularity of these systems, especially for people with disabilities. Voice control in this case is considered as the main management tool, which is extremely necessary due to the lack of ability for people with disabilities to influence conventional controls.

Keywords: voice commands, voice control, system, filtering, noise, microcontroller, microcomputer, smart home.

Вступ

Мова являє собою найважливіший засіб людського спілкування. За свою здатність передавати інформацію голосом людина і виділяється як розумна, високорозвинута істота. Серед величезної кількості живих істот, що населяють наш світ, тільки людина виявилася здатною розвинути існуючий в рудиментарному стані голосовий апарат для кодування і передачі інформації. Довгий час процес взаємодії людини з програмними електронними технічними засобами був доступний тільки вузьким фахівцям, які спілкувалися з машиною за допомогою діалогового інтерфейсу. Винахід графічного інтерфейсу призвів до поширення персональних комп'ютерів та інших гаджетів, однак людина завжди прагнула до більш універсального і природного способу взаємодії – голосового керування. Голосове керування основане на технології розпізнавання мови, що представляє собою обробку мовних сигналів з метою фільтрації і пригнічення шуму, сегментації на інформативні ділянки, визначення інформативних параметрів, що відображають унікальні властивості мови і розпізнаванні. Коректне розпізнавання мови – одна із найцікавіших і складних завдань голосового керування. Мовні технології є ключовим фактором у розвитку автоматизованого оточення людини, починаючи від вдосконалення робочих і дослідних процесів і закінчуючи областю персонального застосування сучасних технологій. Робота переважної більшості мовних додатків неможлива без здійснення попередньої часової сегментації мови, тобто поділу мовного сигналу на квазістаціонарні за певними характеристиками часові фрагменти. Залежно від того, яка задача стоїть перед конкретним мовним додатком, застосованого методу рішення і умов роботи, необхідний рівень сегментації мовного сигналу буде відрізнятися. Це породжує велику різноманітність методів обробки мовних сигналів, в тому числі і сегментації. Незважаючи на високу швидкість розвитку обчислювальної техніки та інформаційних технологій, основні проблеми мовних додатків до сих пір залишаються актуальними. Основною причиною є складність структури мовного сигналу: величезна різноманітність фонетичних одиниць мови, інтонаційних барв, особистісних особливостей мовця. Слід врахувати також різноманітність зовнішніх факторів, що впливають на запис і передачу голосу. Крім того, ситуація ускладнюється великою кількість мов світу (порядку 7000 мов). Тому продукти які виникають на ринку обмежені буквально кількома спорідненими мовами і взагалі не працюють з іншими типами мов. Внаслідок чого мовні сигнали досить складно детально дослідити і описувати за допомогою математичних моделей. Показовим є фактична

відсутність систем розпізнавання української мови з великим словником. Перераховані фактори визначають і основні недоліки існуючих алгоритмів часової сегментації мовних сигналів: недостатня точність визначення меж сегментів, висока ресурсомісткість, значне погіршення роботи за наявності шумів. Через низьку ефективність традиційних методів обробки нелінійних і нестаціонарних сигналів, використання існуючих алгоритмів і вузлів в спеціалізованих системах голосового керування стають малоефективними. Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок про актуальність вдосконалення наявних та створення нових підходів до вирішення завдання підвищення ефективності систем голосового керування шляхом розробки нових алгоритмів і вузлів, підвищення ефективності фільтрації, сегментації, виділення інформативних параметрів і розпізнавання мовних сигналів системи голосового керування.

Основна частина

Мовні технології дозволяють створювати інтуїтивно зрозумілі, легкодоступні і швидкі в застосуванні інтерфейси для «спілкування» людини з комп'ютеризованим технічним оточенням. Перелік актуальних додатків, які можуть бути реалізовані за рахунок мовних технологій досить великий. Це може бути голосовий помічник для електронних і аудіо книг, детектор телефонних номерів та електронних адрес, протоколювання нарад, в тому числі з ідентифікацією поточного оратора, голосовий пошук інформації, голосова навігація (синтез і розпізнавання), системи типу “розумний будинок” тощо [1]. Основні задачі систем обробки мовних команд наведені на рис. 1.

Дослідження [2] показали, що коливання голосових зв'язок характеризуються нерегулярністю, яка проявляється у вигляді значних змін тривалості періодів основного тону (на 10–30 %) і у вигляді невеликих флуктуацій сусідніх періодів тону. Нерегулярності виникають через неповне змикання голосових зв'язок на початку і в кінці тональних ділянок, при цьому періоди з неповним змиканням голосових зв'язок чергуються з періодами з повним змиканням. Розподіл частот основного фону є нормальним в логарифмічному масштабі і описується наступними формулами для чоловічого і жіночого голосів відповідно:

$$p_ч = 2,26T_0 \exp\left[-84,5\left(\lg\frac{137}{T_0}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$p_ж = 3,16T_0 \exp\left[-166\left(\lg\frac{247}{T_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

де T_0 – період основного тону, $p_ч$, $p_ж$ – розподіл частот основного тону для чоловічого і жіночого голосів відповідно.

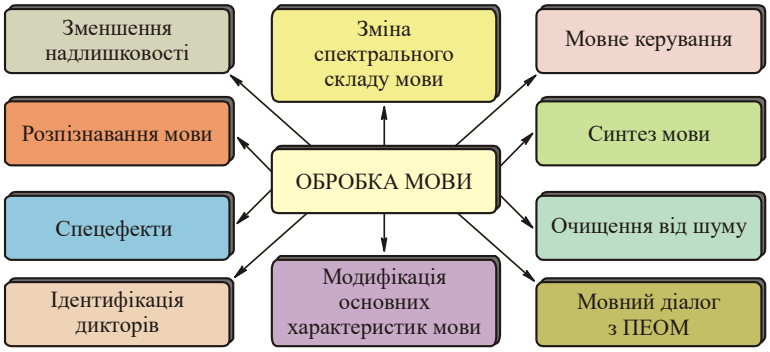


Рис. 1. Основні задачі систем обробки мовних команд

Голосове керування це спосіб взаємодії з керуючою системою за допомогою мовних команд. Воно зводиться до задачі розпізнавання, проте на відміну від систем розпізнавання мови, голосове керування призначене для розпізнавання окремих керівних команд. На рис. 2 представлена класична структурна схема системи голосового керування (СГК), яка складається з мікрофону, блоку обробки і блоку розпізнавання. Мова у вигляді звукових хвиль фіксується мікрофоном, який перетворює їх в аналоговий мовний сигнал. У блоці обробки аналоговий сигнал перетвориться в цифрову форму, проходить фільтрацію, сегментується на фрагменти, в яких відбувається виділення інформативних параметрів для подальшого аналізу. У блоці розпізнавання відбувається безпосереднє порівняння мовної команди, що надійшла в систему із шаблоном з бази даних, отриманим в ході навчання системи. Зазвичай база даних шаблонів формується на етапі розробки системи, може доповнюватися і коректуватися в подальшому при експлуатації під конкретного користувача. Процес створення бази даних шаблонів часто проходить в інтерактивному режимі для навчання системи.

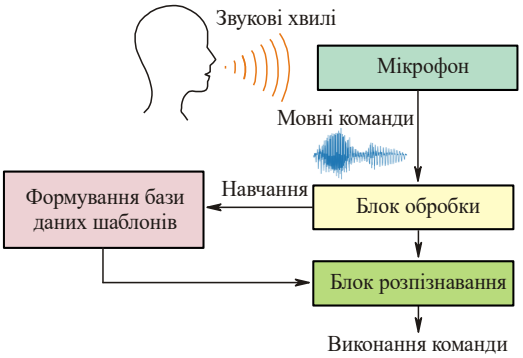


Рис. 2. Класична структурна схема СГК

Розпізнавання окремих мовних команд простіше, ніж розпізнавання злитого мовлення і не вимагає великих обчислювальних потужностей. Саме з цієї причини на сьогодні існує величезний вибір програмного і апаратного забезпечення із задовільною якістю розпізнавання. Однак дослідження показує, що системи досі не подолали рівень точності розпізнавання в 85 %, тоді як у людини цей показник становить 96–98 %.

Для повної оцінки сучасного стану систем голосового керування (СГК), на рис. 3 наведено класифікацію за такими основними параметрами: технічне виконання, призначення, персоналізація, тип мовлення, тип структурної одиниці і розмір словника. Таким чином, системи голосового керування можна класифікувати за параметрами, що описують споживчі властивості систем та за параметрами технічної реалізації систем. Системи з технічної реалізації включають в себе програмні продукти і програмно-апаратні засоби.

Найчастіше задача зводиться до аналізу ізольованого слова або словосполучення з чітко вираженими межами (мовної команди), що включає в себе наступні завдання: реєстрація, попередня корекція, фільтрація, сегментація сигнал / пауза, визначення інформативних параметрів і розпізнавання.

На рис. 4 представлені етапи обробки мовних команд в системі голосового керування, що виконує перераховані вище завдання.

Реєстрація являє собою запис мовної команди в режимі реального часу, формування електричного аналогового сигналу та перетворення його у цифрову форму.

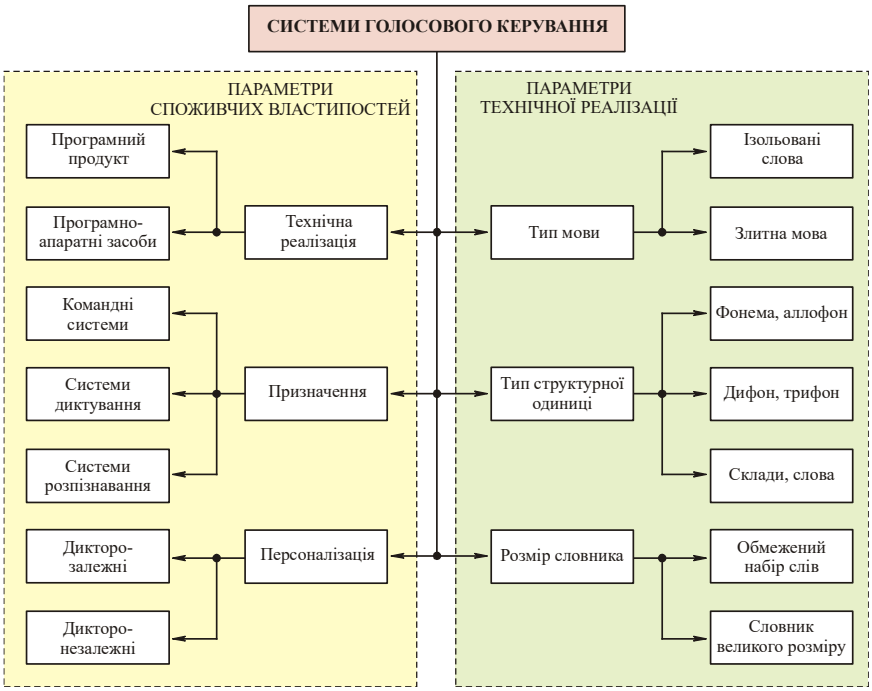


Рис. 3. Класифікація систем голосового керування

Попередня корекція використовується для усунення природних спотворень спектру звуку (мінус 6 дБ на октаву), що виникають в мовному апараті людини при розмові. Сигнал мовної команди пропускають через корегуючий фільтр з функцією передачі:

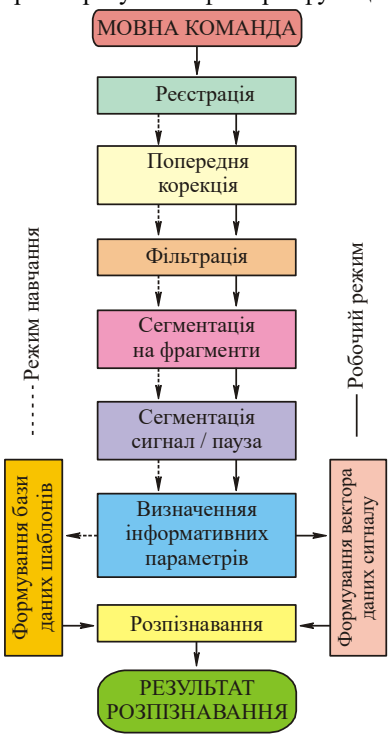


Рис. 4. Етапи обробки мовних команд в СГК

$$W(z)=\sum_{k=0}^{m} a_k z^{-k}, \quad (3)$$

де a_k – постійні коефіцієнти, m – ціле число (m>0), k – номер коефіцієнта. Найчастіше m=1, а передавальна функція має вигляд:

$$W(z)=a_0-a_1 z^{-1} \quad (4)$$

Фільтрація дозволяє підвищити розбірливість і зменшити частку шумів, викликаних як акустичними, так і технологічними причинами. Стосовно мовних сигналів, шум – це сукупність аперіодичних звуків різної інтенсивності і частоти, які змінюють інформативні ознаки сигналу. За взаємодією з корисним мовним сигналом шуми поділяються на адитивні та мультиплікативні. Адитивні шуми складаються з корисним сигналом і вносять незначну похибку. Мультиплікативні шуми перемножуються з корисним сигналом, вносять найбільшу похибку і можуть змінювати інформативні параметри мовних команд. У загальному вигляді, комбінація сигналу і шуму, виглядає наступним чином:

$$S(t)=[(k_s(t)+k_n(t)]\cdot e(t)+n(t), \quad (5)$$

де $S(t)$ – мовний сигнал, $e(t)$ – корисний мовний сигнал; $k_s(t)$ – коефіцієнт, що характеризує корисний мовний сигнал; $k_n(t)$ – коефіцієнт, що характеризує мультиплікативний шум; $n(t)$ адитивний шум.

Сегментація в обробці мовних команд – лінійний розподіл мовного потоку на складові відрізки (фрагменти). Сегментація сигнал / пауза представляє собою завдання визначення моментів початку і закінчення фрази. При наявності шуму дана задача є однією з найважливіших в області обробки мовних команд, так при голосовому керуванні важливо точно визначити моменти початку і закінчення команди.

Визначення інформаційних параметрів – завдання визначення унікальних властивостей і характеристик мовних сигналів. Основні поняття, що характеризують інформативні параметри мовлення людини, пов'язані з формою, розмірами, динамікою зміни мовного апарату і описуються емоційним станом людини. Розпізнавання мовних команд є кінцевою метою обробки в системах голосового керування. Принцип роботи досить простий і полягає в порівнянні мовної команди, яка надійшла в систему, з шаблоном із бази даних, отриманої в ході навчання системи. Головна особливість, що впливає на якість розпізнавання полягає в застосовуваних методах порівняння.

На рис. 5 наведено класифікацію методів обробки в системах голосового керування.

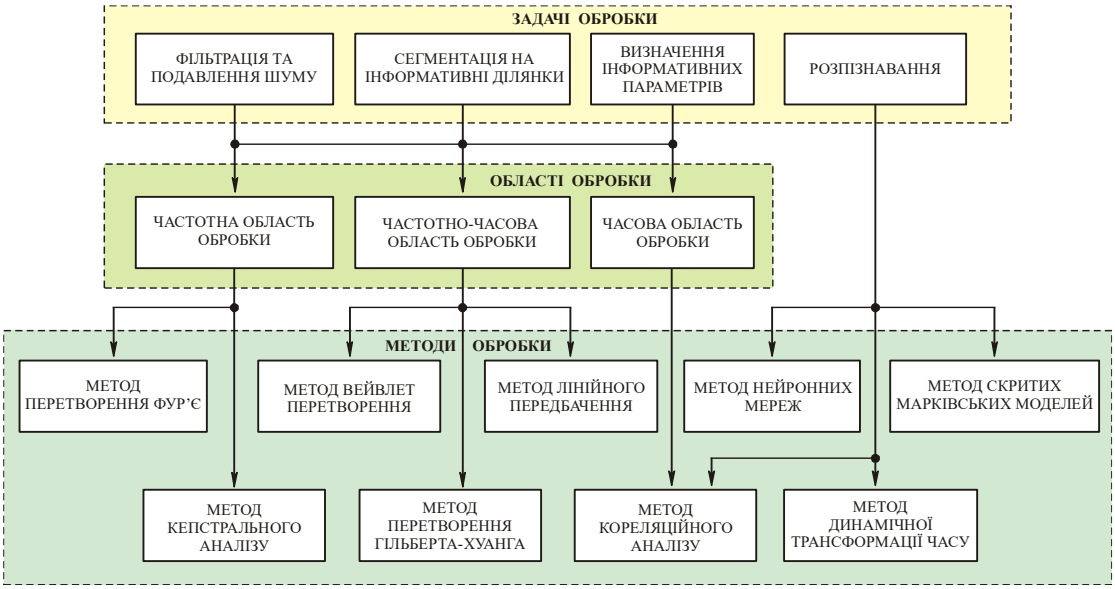


Рис. 5. Класифікація методів обробки мовних сигналів

Класифікація методів виконана з урахуванням основних завдань обробки в підсистемах голосового керування: фільтрація і пригнічення шуму, сегментація на інформативні ділянки, визначення інформативних параметрів і розпізнавання. Області обробки сигналів можна розділити на: частотну, часову і частотно-часову [3]. В залежності від обробки, методи слід розділити на групи, реалізовані різними видами аналізу:

– метод перетворення Фур'є (ПФ);
– метод вейвлет-перетворення (ВП);

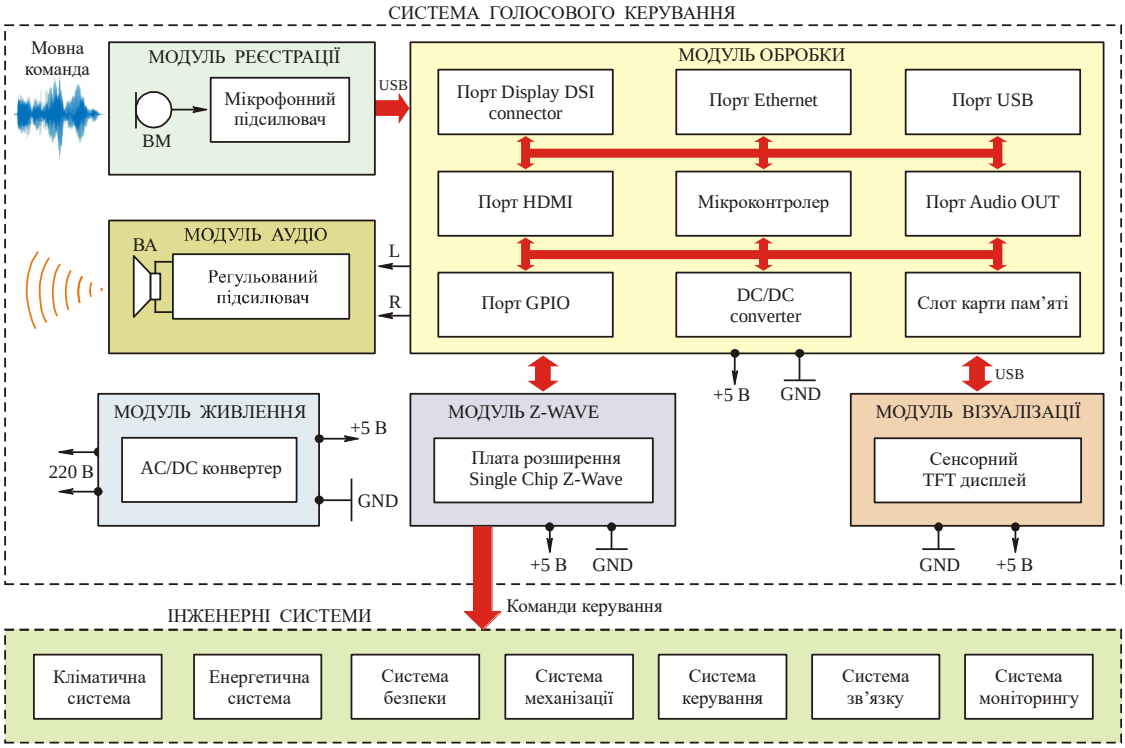


Рис. 6. Структурна схема системи голосового керування комплексу "Smart home"

– метод перетворення Гільберта-Хуанга (ПГС);
– метод кепстрального аналізу (КА);
– метод лінійного передбачення (ЛП);
– метод кореляційного аналізу (КРА);
– метод нейронних мереж (НМ) ;
– метод прихованих марківських моделей (ПММ);
– метод динамічного трансформування часу (ДТЧ).

На основі проведеного аналізу, була програмно-апаратно реалізована системи голосового керування за технологією “Smart home” (рис. 6, 7). Вона складається з наступних модулів: реєстрації, обробки, аудіо, живлення, Z-Wave та візуалізації.

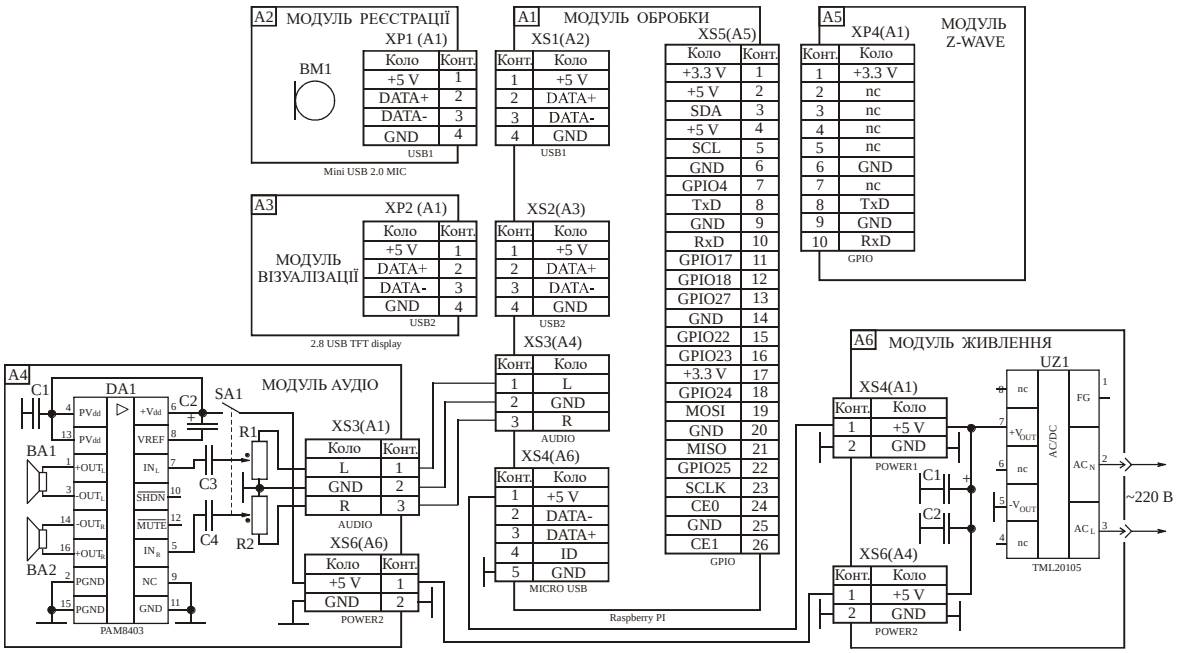


Рис. 7. Схема електрична функціональна системи голосового керування комплексу “Smart home”

Реєстрація сигналів мовних команд функціонально реалізована за допомогою модуля реєстрації, що складається з USB мікрофону. Шумозниження мікрофонного каналу реалізовано програмно.

В якості модуля оброки можна використати будь-яку сучасну платформу – STM32, Arduino, BeagleBone Black, Raspberry PI, Orange Pi тощо. В даному випадку застосовано одноплатний мікрокомп’ютер Raspberry PI на основі мікрочіпу Broadcom BCM2836 (рис. 8). Мікроконтролер спільно з додатковим периферійним обладнанням функціонально реалізований у вигляді модуля обробки на борту Raspberry Pi. Периферійне обладнання модуля відповідно до функціоналу забезпечує нормальну працездатність системах голосового керування.

Режими роботи системи голосового керування передбачають попереднє налаштування і навчання. Для цього передбачено модуль візуалізації, реалізований у вигляді 2.8" USB TFT display for Raspberry Pi (рис. 9). Попереднє налаштування здійснюється з використанням сенсорного TFT дисплею для введення і відображення інформації про налаштування. Також даний інтерфейс зручний в якості інформаційної системи. Як і модуль реєстрації, так і модуль візуалізації мають USB інтерфейс, що спрощує як самі відповідні тракти побудови, так і їх комутацію.

Рис. 8. Зовнішній вигляд платформи Raspberry Pi разом із встановленим модулем Z-Wave RaZberry

Рис. 9. Зовнішній вигляд 2.8" USB TFT display for Raspberry Pi

Контроль режимів роботи системи реалізується не тільки візуально, але і за допомогою модуля аудіо обробки, що здійснює звукову індикацію режимів роботи та поточні сповіщення. Ця опція особливо важлива для людей з обмеженими можливостями і дозволяє обрати будь-який зручний спосіб спілкування із системою “Smart home”.

Система голосового керування передбачає керування інженерними підсистемами – клімат-комфорту, енергетичними блоками, засобами механізації та автоматизації, тощо. Для забезпечення бездротового зв’язку використовується модуль Z-Wave у вигляді додаткової плати розширення RaZberry, яка встановлюється безпосередньо у верхню частину слоту GPIO Raspberry Pi (рис. 7, 8).

Висновки

В роботі сформовані основні задачі систем обробки мовних команд, здійснена класифікація систем голосового керування, проведено аналітичний огляд алгоритмів та етапів обробки мовних команд. Розроблено структурну та функціональну схеми електричні системи голосового керування комплексу “Smart home” по бездротовому протоколу передачі даних Z-Wave. Програмно-апаратно реалізована система голосового керування на базі модуля обробки, модуля Z-Wave, модуля візуалізації, модуля реєстрації, модуля живлення і модуля аудіо з відповідними колами комутації та регулювання. Розробка актуальна з огляду на популярність даних систем, а особливо для людей з обмеженими можливостями. Голосове керування в даному випадку розглядається як основний інструмент керування, який вкрай необхідний через відсутність можливості у людей з обмеженими можливостями впливати на звичайні органи керування.

Література

1. Smart Home. Your Trusted Advisor in Home Automation [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу : https://www.smarthome.com/.

2. Алимурадов А. К. Обработка речевых команд в системах голосового управления / А. К. Алимурадов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 50–57.

3. Стецюк В. І. Системи автоматизованого управління телекомунікаційних мереж / В. І. Стецюк, В. В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. – 2018. – № 6. Том 2. – С. 178–182.

References

1. Smart Home. Your Trusted Advisor in Home Automation [Elektronnyi resurs]. – 2019. – Rezhym dostupu : https://www.smarthome.com/.

2. Alimuradov A. K. Obrabotka rechevyh komand v sistemah golosovogo upravleniya / A. K. Alimuradov // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. – 2014. – № 1 (7). – S. 50–57.

3. Stetsiuk V. I. Systemy avtomatyzovanoho upravlinnia telekomunikatsiinykh merezh / V. I. Stetsiuk, V. V. Mishan // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ceriia: tekhnichni nauky. – 2018. – № 6. Tom 2. – S. 178–182.

Рецензія/Peer review : 27.10.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-131-133
УДК 004.627

М.М. ЛЕБІГА, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК, В.Ю. МЕДВЕДЧУК
Хмельницький національний університет

КОМБІНОВАНИЙ АЛГОРИТМ СТИСНЕННЯ ДАНИХ, ПРЕДСТАВЛЕНИХ В ТЕКСТОВОМУ ФОРМАТІ

В роботі розроблено комбінований алгоритм стиснення текстових даних задля мінімізації об'єму контенту, який є основою відповідної інформаційної технології. В результаті аналізу отриманих експериментальних даних було обрано оптимальні шляхи мінімізації об'єму текстового контенту на основі алгоритму Хаффмана за допомогою основних і найбільш розповсюджених типів структур текстових даних.

Ключові слова: комбінований алгоритм, алгоритм Хаффмана, мінімізація, оптимізація, граф, дерево, текстові дані, словник.

M.M. LEBIGA, O.A. PASICHNYK, T.K. SKRYPNYK, V.Y. MEDVEDCHUK
Khmelnytskyi National University

COMBINED TEXT DATA COMPRESSION ALGORITHM

The purpose of the work is to develop a combined algorithm for text data compression. To achieve this goal, the following research objectives have been identified: reviewing existing universal data compression algorithms; analysis of data types and text formats; development of a specialized compression algorithm based on the Huffman algorithm, taking into account the data structure. The two main and most common types of text data structure are graph and tree. To achieve the greatest compression of texts in natural languages, it is decided to use a tree-like structure of the dictionary with a fixed number of branches at each level, as the size of branching decreases with increasing depth, which with a fixed size of branches will lead to a strong redundancy and high memory consumption. To achieve the highest compression of html and xml texts, it is decided to use a dictionary based on a weighted graph with an unspecified number of branches on the node. The graph provides a flexible system by which any structure can be emulated, but constructing such a structure is challenging. An analysis of the amount of savings by optimization is calculated based on the difference between the savings of recording branch information and the number of bits that need to be recorded to inform the decoder of branch usage. If the difference is greater than zero, the information is considered to be advantageous for recording. To record tree-based dictionary optimization information, you must specify all the dictionary branches used. This can be done using a recursive algorithm. The result of the work is the development of a combined algorithm for compressing text data whose structure can be represented as a tree or graph. The developed compression algorithm is based on the Huffman algorithm and is the basis for implementation of the relevant information system.

Keywords: combined algorithm, Huffman algorithm, minimization, optimization, graph, tree, text data, dictionary.

Вступ

В сучасному світі електронні засоби зберігання, обробки і передачі інформації є всюдисущими і буденними, ми вже насилу уявляємо життя без них. Інформація стала основою нашого життя і її стає дедалі більше, що вимагає все більших ресурсів для її зберігання. Обсяги інформації, одержувані і відправлені за допомогою мережі Інтернет, зростають, а в сукупності це означає зріст витрат, необхідних для зберігання і транспортування інформації з використанням існуючих архітектур і технологій. У зв'язку з цим алгоритми стиснення даних актуальні і активно розвиваються.

Стиснення даних – це процедура перекодування даних, яка проводиться з метою зменшення їхнього обсягу, розміру, об'єму.

Стиснення базується на усуненні надлишку інформації, яка міститься у вихідних даних. Наприклад, повторення в тексті фрагментів (наприклад, слів природної або машинної мови). Подібний надлишок зазвичай усувається заміною повторюваних послідовностей коротшим значенням (кодом). Інший вид надлишковості пов'язаний з тим, що деякі значення в даних, що стискаються, трапляються частіше інших, при цьому можна замінювати дані, що часто трапляються, коротшими кодами, а ті, що рідко, довшими (ймовірнісне стиснення). Стиснення даних, які не мають властивості надлишку (наприклад випадковий сигнал чи шум), неможливе. Також, зазвичай, неможливо стиснути зашифровану інформацію.

Існує багато практичних алгоритмів стиснення даних, але всі вони базуються на трьох теоретичних способах зменшення надлишковості даних. Перший спосіб полягає в зміні вмісту даних, другий – у зміні структури даних, а третій – в одночасній зміні як структури, так і вмісту даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Донині було проведено багато досліджень різноманітних алгоритмів стиснення даних, представлених у текстовому форматі. У роботах таких закордонних вчених, як A. Lempel, J. Ziv [1, 2], T.A. Welch [3], J.A. Storer [4], розглядається розробка та застосування універсальних та спеціалізованих алгоритмів стиску даних представлених у різних форматах, але найбільше уваги приділено саме текстовому. Ще детальніше проблеми застосування алгоритмів стиснення даних представлених у текстовому форматі розглянуто у опублікованій доповідній роботі німецьких дослідників D. Hucke, M. Lohrey, C.P. Reh [5]. Також зацікавленість у дослідженні алгоритмів стиснення даних, представлених у текстовому форматі, виявили вітчизняні дослідники та їх колеги з країн СНД. Однією з останніх публікацій є книга О.В. Аграновського та Р.А. Хаді [6], де розглядаються алгоритми стиснення текстових даних та метод криптографічного стиснення.

Актуальність дослідження

Мета роботи полягає у розробці комбінованого алгоритму стиснення текстових даних. Для досягнення поставленої мети визначені такі задачі дослідження: проведення огляду існуючих універсальних алгоритмів стиснення даних; виконання аналізу типів даних та форматів побудови тексту; розробка спеціалізованого алгоритму стиснення на основі алгоритму Хафмана з урахуванням структури даних. Дослідження, що спрямовані на розробку комбінованого алгоритму стиснення текстових даних, є актуальною задачею

Виклад основного матеріалу

Двома основними і найбільш розповсюдженими типами структури текстових даних є граф і дерево.

Граф [1] – це складна нелінійна багатозв'язна динамічна структура, яка відображає властивості і зв'язки складного об'єкта.

Графічне представлення орієнтованого графа наведено на рис. 1.

Багатозв'язна структура має такі властивості:

– на кожний елемент (вузол, вершину) може бути довільна кількість посилань,

– кожний елемент може мати зв'язок з будь-якою кількістю інших елементів,

– кожна зв'язка (ребро, дуга) може мати напрямок і вагу.

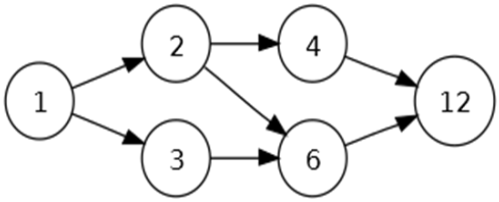


Рис. 1. Графічне представлення орієнтованого графа

У вузлах графа міститься інформація про елементи об'єкта. Зв'язки між вузлами задаються ребрами графа. Граф можна розбити по типу ребер, які він містить:

– орієнтований граф – всі ребра графа напрямлені,

– неорієнтований граф – всі ребра графа ненапрямлені,

– змішаний граф – граф з ребрами обох типів.

Для орієнтованого графа число ребер, що входять у вузол, називається напівстепенем заходу вузла, що виходять з вузла – напівстепенем результату. Кількість вхідних і вихідних ребер може бути будь-якою, в тому числі і нульовою. Граф без ребер є нуль-графом.

Якщо ребрам графа відповідають деякі значення, то граф і ребра називаються виваженими. Мультиграфом називається граф, що має паралельні (що з'єднують одні і ті ж вершини) ребра, в іншому випадку граф називається простим.

Шлях в графі – це послідовність вузлів, пов'язаних ребрами; елементарним називається шлях, у якому всі ребра різні, простим називається шлях, у якому всі вершини різні. Шлях від вузла до самого себе називається циклом, а граф, що містить такі шляхи – циклічним.

Два вузла графа суміжні, якщо існує шлях від одного з них до іншого. Вузол називається інцидентним до ребра, якщо він є його вершиною, тобто ребро направлено до цього вузла.

Дерево [2] – це структура даних, що представляє собою сукупність елементів і відношень, що утворюють ієрархічну структуру цих елементів. Кожний елемент дерева називається вершиною (вузлом) дерева. Вершини дерева з'єднані напрямленими дугами, які називають гілками дерева. Початковий вузол дерева називають коренем дерева, йому відповідає нульовий рівень. Листям дерева називають вершини, в які входить одна гілка і не виходить жодної гілки.

Дерева особливо часто використовують на практиці при зображенні різних ієрархій. Приклад графічного представлення дерева представлений на рис. 2.

Для досягнення найбільшого стиснення текстів на природних мовах вирішено використовувати деревоподібну структуру словника з нефіксованою кількістю гілок на кожному рівні, так як зі збільшенням глибини розмір розгалуження знижується, що при фіксованому розмірі гілок призведе до сильної надмірності і великому споживанню пам'яті.

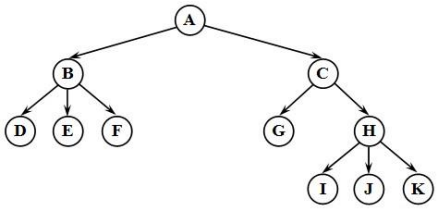


Рис. 2. Графічне представлення дерева

Для досягнення найбільшого стиснення текстів що мають формат html і xml вирішено використовувати словник заснований на орієнтованому зваженому графі з нефіксованою кількістю гілок на вузлі. Граф надає гнучку систему, за допомогою якої можна емулювати будь-яку структуру, однак побудова такої структури є складним завданням.

Аналіз розміру економії за рахунок оптимізації [3] розраховується виходячи з різниці між економією від запису інформації про гілку і кількістю біт, які необхідно записати, щоб повідомити декодеру [4] про використання гілки.

Якщо різниця більше нуля, то інформація вважається вигідною для запису. Для запису інформації про оптимізацію словника на основі дерева нам необхідно вказати всі використовувані гілки словника. Це можна зробити за допомогою рекурсивного алгоритму [5], що складається з наступних кроків:

– якщо вузол пустий, то завершуємо роботу. В іншому випадку:

– якщо поточний вузол має економію від запису використовуваних гілок, то пишемо 1;

– знаючи номери граничних гілок (тобто коли гілка і використовується, а гілка і + 1 або і-1 не використовується), пишемо всі граничні гілки (тобто пишемо кордон діапазонів використовуваних гілок, поточного вузла). Кількість біт, необхідних для запису номера гілки, розраховується за формулою (1);

– для кожної використовуваної гілки повторюємо алгоритм.

– інакше пишемо 0 і завершуємо роботу.

Для запису інформації про оптимізацію словника на основі графа нам необхідно вказати гілки, які використовуються для кодування, для кожного вузла. Це можна зробити за допомогою алгоритму, що складається з наступних кроків для кожного вузла:

– якщо вузол має економію від запису використовуваних гілок, то пишемо 1.

– знаючи номери граничних гілок (тобто коли гілка і використовується, а гілка і + 1 або і-1 не використовується), пишемо всі граничні гілки (тобто пишемо кордон діапазонів використовуваних гілок, поточного вузла). Кількість біт, необхідних для запису номера гілки, розраховується за формулою (1)

$$K = \frac{\log(N)}{\log(2)} + 1, \tag{1}$$

де N – кількість гілок в поточному вузлі;

– інакше пишемо 0.

Висновки

Результатом роботи є розробка комбінованого алгоритму стиснення даних представлених в текстовому форматі структура яких може бути представлена як дерево або граф. Розроблений алгоритм стиснення базується на алгоритмі Хаффмана і є основою для реалізації відповідної інформаційної системи.

Література

1. Lempel A., Ziv J. Compression of individual sequences via variable-rate coding. IEEE Transactions on Information Theory. 1978. Т. 24, № 5. P. 530–536.
2. Ziv J. A constrained-dictionary version of LZ78 asymptotically achieves the finite-state compressibility with a distortion measure. IEEE Information Theory Workshop. 2015. P. 1–4.
3. Welch T. A. A technique for high-performance data compression. Computer. 1984. Т. 6, № 17. P. 8–19.
4. Storer J. A. Data Compression: Methods and Theory. New York, USA: Computer Science Press, 1988. 413 p.
5. Hucke D., Lohrey M., Reh C. P. The smallest grammar problem revisited. String Processing and Information Retrieval (SPIRE). 2016. Т. 9954. P. 35–49.
6. Граф [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Граф_(математика).
7. Дерево [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Дерево_(теорія_графів).
8. Оптимізація [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Оптимізація_(інформатика).
9. Декодер [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://en.wikipedia.org/wiki/Decoder.
10. Рекурсивний алгоритм: [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://mmsa.kpi.ua/sancho/ASD_HTM/Recurs01.html.

References

1. Lempel A., Ziv J. Compression of individual sequences via variable-rate coding. IEEE Transactions on Information Theory. 1978. Т. 24, № 5. P. 530–536.
2. Ziv J. A constrained-dictionary version of LZ78 asymptotically achieves the finite-state compressibility with a distortion measure. IEEE Information Theory Workshop. 2015. P. 1–4.
3. Welch T. A. A technique for high-performance data compression. Computer. 1984. Т. 6, № 17. P. 8–19.
4. Storer J. A. Data Compression: Methods and Theory. New York, USA: Computer Science Press, 1988. 413 p.
5. Hucke D., Lohrey M., Reh C. P. The smallest grammar problem revisited. String Processing and Information Retrieval (SPIRE). 2016. Т. 9954. P. 35–49.
6. Graph [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Graph_(mathematics).
7. Tree [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Tree_(graph theory).
8. Optimization [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Optimization_(Computer Science).
9. Decoder [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Decoder.
10. Recursive algorithm [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/http://mmsa.kpi.ua/sancho/ASD_HTM/Recurs01.html.

Рецензія/Peer review : 15.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-134-137
УДК 621.319:539.4

Ю.І. ЯЦИНИЧ, В.П. РОЙЗМАН, А.В. ГОРОШКО
Хмельницький національний університет

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ГЕРМЕТИЗОВАНИХ МІКРОСКЛАДАНЬ НВЧ-МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В роботі запропоновано акустико-емісійний метод і засіб неруйнівного контролю і прогнозування міцності і герметичності зварних алюмінієвих корпусів мікроскладань НВЧ-діапазону, які піддаються перепадам атмосферного тиску внаслідок підняття на висоту під час експлуатації на літальних апаратах. Представлені результати досліджень, на основі яких вироблено практичну методику неруйнівного контролю міцності та попередження небезпечних станів корпусів мікроскладань НВЧ, встановлених на борту літака, в якому датчик АЕ служить датчиком безпеки на борту і за 6–10 циклів (тобто зльотів і приземлень) до катастрофічної руйнації корпусу «попереджає» про початок процесу руйнування. Спроектований і створений портативний АЕ-прилад, індикаторний пристрій якого сигналізує про наявність АЕ, яка перевищує заздалегідь установлений амплітудний рівень.

Ключові слова: неруйнівний контроль, міцність, прогнозування, акустична емісія, мікроскладання НВЧ, зліт/посадка літака.

YU.I. YATSYNYCH, V.P. ROYZMAN, A.V. GOROSHKO
Khmelnytskyi National University

NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND FORECASTING OF STRENGTHENED STRENGTHS MICROCOMPOSITION OF UHF ACOUSTICAL EMISSION METHOD

The reasons for depressurization of the microwave housing of microwave microwave assemblies are analysed in the paper. It was found that the depressurization occurred as a result of cyclic loading in excess of μm. Experimental facilities have been created for experiments with the loading of micro assemblies by internal pressure and recording the parameters of acoustic emission signals. An acoustic emission method and a means of non-destructive control and prediction of the strength and tightness of microwave-welded welded aluminium enclosures that are exposed to atmospheric pressure changes due to elevation during operation on aircraft are proposed. The results of researches on the basis of which the practical method of non-destructive strength control and prevention of the dangerous states of microwave housing cases installed on board an aircraft in which the AE sensor serves as a safety sensor on board and for 6-10 cycles (take-offs and landings) before catastrophic rune are presented Corps warns of the beginning of the destruction process. A portable AE device has been designed and created, the indicator device of which indicates the presence of AE that exceeds the pre-set amplitude level.

Keywords: non-destructive testing, durability, forecasting, acoustic emission, microwave assembly, airplane take-off.

Постановка проблеми. У мікроелектроніці, силовій електроніці та електротехніці широко використовуються герметизовані елементи та функціональні вузли. Герметизація виключає вплив навколишнього середовища на внутрішній простір елементів і досягається різноманітними конструкторськими і технологічними засобами. Поряд з компаундуванням для герметизації функціональних вузлів електроніки, зокрема мікроскладань НВЧ-діапазону, які піддаються впливу коливань атмосферного тиску, застосовують зварні металеві корпуси. Така конструкція дає змогу не лише захистити виріб від дії перепаду тиску при зльотах/посадках літака, на якому вони функціонують, а й забезпечити ефективне екранування електронного вузла (рис. 1) [1]. При експлуатації мікроскладань НВЧ на літаках нерідко виникає їх розгерметизація через вплив циклічної зміни тиску, що відповідають зльоту/посадці. Внаслідок підняття на висоту всередині корпусу викликає надлишковий тиск, що може зруйнувати з'єднання корпусу з кришкою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні проблема механічної міцності мікроскладань і друкованих плат є актуальною і частково вирішується конструкторськими і технологічними методами на етапі виготовлення. Так, у роботі [2] автори застосовують лазерні методи підвищення надійності деяких електричних і електронних компонентів, що включають технологію з'єднання, модифікації поверхні, точного формування і лазерного зварювання.

У роботі [3] представлені результати досліджень міцності гнучких елементів електроніки і методи забезпечення їх стійкості до деформації. Різні автори [4] пропонують методи розрахунку і оцінювання пошкоджень в електронних паяних з'єднаннях за умов дії випадкової вібрації на друкованій платі.

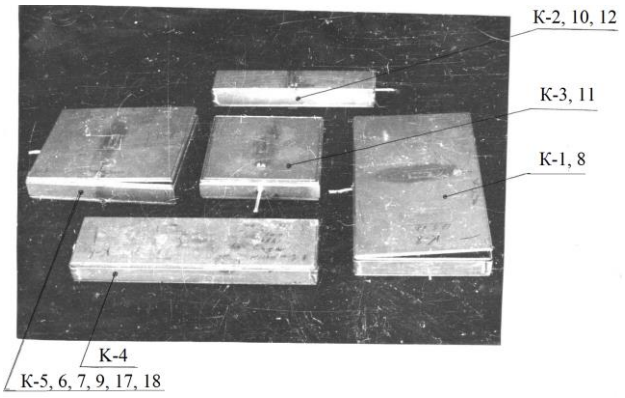


Рис. 1. Типи гермовузлів мікроскладань

Проблема підвищення надійності з'єднань корпусів мікроскладань НВЧ піднімалась у роботах вітчизняних і закордонних вчених [1, 5, 6]. Так, у [5] досліджено вплив технології зварювання на міцність з'єднань мікроскладань і мікросхем. У роботах [6, 7]

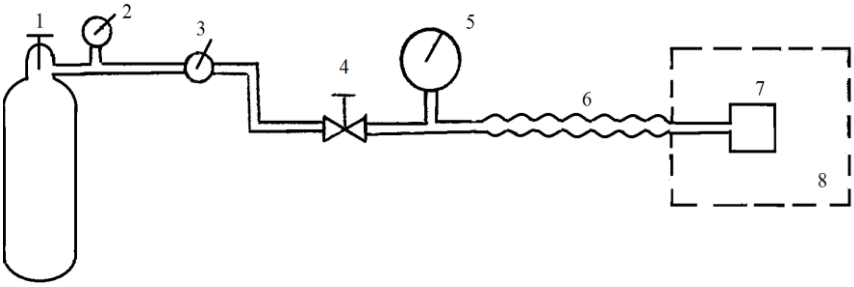
автори дослідили напружено-деформований стан плат мікроскладань при динамічних навантаженнях, у [8] представлені результати ґрунтовних досліджень напружено-деформованого стану мікроскладань під дією циклічно зміцнювальної температури та механічного зусилля, досліджені деформації паяних з'єднань. Результати огляду закордонних літературних джерел виявили повну відсутність методів неруйнівного контролю і прогнозування технічного стану корпусів мікроскладань в процесі експлуатації. В Україні ж цю проблему досліджували Ройзман В.П., Цасюк В.В., Ковтун І.І. Деякі їх результати опубліковані у [9–11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Корпуси досліджуваних мікроскладань виготовляються з алюмінієвого сплаву АМГ-2 і відрізняються один від одного розмірами і конструкцією вузла герметизації кріплення кришок корпусів до основи. У першій групі корпусів (К-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) герметизація досягається зварюванням місць стику кришок і підкладки лазерним променем, при цьому все навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається або повністю зварним швом, або звареним швом і конструкцією виробу. У другій групі корпусів (КБ-1 і КБ-2 корпусу вузла ВЧ-0100) герметизація місць стиків кришки і підкладки досягається за рахунок застосування герметика Віксинт (КБ-1) або пайки припоєм (КБ-2). Для цієї групи корпусів навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається в основному конструкцією корпусу. Корпус мікросхеми НВЧ повинен забезпечувати жорстке закріплення плати і з'єднання її виводів з переходами, що забезпечують введення-виведення енергії; захист схеми від зовнішніх впливів; функцію екрану; тепловідведення від ділянок плати, в яких розсіюється електромагнітна енергія [12].

Для усунення проблеми руйнування корпусів в експлуатації була поставлена задача експериментально знайти граничні значення надлишкового внутрішнього тиску розгерметизації корпусів мікроскладань НВЧ, виміряти механічні напруження на кришках і зварних швах виробів, визначити найбільш ненадійні конструкції, виявити можливість оцінювання надійності герметизації і міцності досліджуваних об'єктів, а також її прогнозування.

Для оцінювання міцності матеріалу і герметичності корпусів мікроскладань НВЧ вирішено було використати метод неруйнівного контролю під час випробувань. Такими методами можна також виявляти потенційно ненадійні з точки зору механічної точності ВЕТ, що у перспективі знизить рівень браку і зменшить витрати на ліквідацію наслідків відмов ВЕТ. Перспективним методом є метод акустичної емісії (АЕ), який дає змогу не лише знаходити місця виникнення потенційно небезпечних дефектів матеріалу на стадії формування тріщин, а й прогнозувати їх розвиток.

Результати досліджень. Для проведення досліджень було створено спеціальну установку, що складається з балона стисненого повітря, манометра для вимірювання величини тиску повітря в балоні, понижувального редуктора для зниження тиску до необхідного рівня, манометра для вимірювання величини надлишкового тиску, що подається в корпус НВЧ, системи шлангів і вентилів (рис. 2).



1 – балон; 2 – манометр; 3 – понижувальний редуктор; 4 – кран відсічки; 5 – манометр зразковий; 6 – гнучкий шланг; 7 – термокамера; 8 – корпус НВЧ
Рис. 2. Схема установки для нагнітання повітря

Для проведення експериментальних досліджень міцності з використанням методу АЕ було створено програмно-апаратний комплекс АЕ на базі серійно випущеного АЕ-приладу АФ-15 і персонального комп'ютера. При розробці комплексу було проведено модернізацію трьох субблоків АЕ-приладу, створено модуль комп'ютерного паралельного інтерфейсу і розроблено пакет прикладних програм, що дало можливість комп'ютеризувати процес збору й опрацювання параметрів сигналів АЕ, тим самим підвищивши кількість опрацьовуваних сигналів у 40 разів. Перераховані установки, пристосування і апаратура об'єднані в єдине робоче місце, що дозволяє проводити дослідження герметичності і міцності мікроскладань НВЧ при зміні температури, тиску в широкому діапазоні, відпрацьовувати методику контролю силових елементів конструкцій за інформативними параметрами АЕ.

У результаті проведених досліджень обґрунтовано і розроблено методику неруйнівного діагностування, прогнозування міцності та герметичності корпусів мікроскладань НВЧ. Згідно з нею, діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів здійснюється при неруйнівному тестуванні корпусів надлишковим внутрішнім тиском. Стиснуте повітря подається всередину корпусу до досягнення тестового тиску $P_{тест} = P_{max(ТУ)} / K_{min}$, де $P_{max(ТУ)}$ – граничний внутрішній надлишковий тиск корпусів за ТУ, K_{min} – коефіцієнт прогнозування тиску розгерметизації (K_{min} = 2). Під час випробування проводиться одночасна реєстрація тиску і параметрів сигналів АЕ. Якщо при навантаженні до $P_{тест}$ виникла АЕ, активність якої перевищила контрольний рівень (15 імп./с), корпус визнається непридатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тисків; за необхідності його тиск розгерметизації визначається за формулою $P_{max}^{прг} = P_{прг} K_{min}$ $P_{max}^{д} = P_{д} K_{min}$, де $P_{прг}$ – тиск, при якому активність сигналів АЕ досягла

контрольного рівня. Якщо ж активність АЕ не перевищила контрольний рівень, корпус вважається придатним для експлуатації в заданому по ТУ діапазоні тисків. Подальші дослідження корпусів проводилися в динамічному пульсуючому режимі навантаження (рис. 3, 4). Необхідність таких досліджень була викликана тим, що при експлуатації на літаках під час злетів і посадок корпусу піддаються змінному надлишковому тискові за пульсуючим циклом напружень і розгерметизовуються, витримавши обмежену кількість циклів. У цьому випадку важливо мати інформацію про зародження і розвиток процесу руйнування їх зварного шва з тим, щоб завчасно вжити необхідних заходів.

Для партії з 20 корпусів 100 циклів випробувань показали наступне: для герметичних корпусів має місце ефект Кайзера, відповідно до якого при повторному навантаженні до попереднього рівня АЕ не відновлюється. Проте для 2-х корпусів, що розгерметизувались під час випробувань, АЕ почала випромінюватись за 6–10 циклів до розгерметизації і вже не зменшувалася, а прогресувала аж до розгерметизації [10].

У результаті було розроблено метод неруйнівного контролю міцності та герметичності корпусів, експлуатованих на борту літака. Контроль корпусів проводиться автоматично під час польотів за допомогою вимірювального АЕ-приладу, встановленого на борту літака. Датчик АЕ, що передає сигнали АЕ у вимірювальний прилад, встановлюється на контрольованому корпусі, а індикацію приладу, що сигналізує про випромінювання сигналів АЕ, виведено в кабіну пілота. Якщо з будь-яких причин прилад АЕ не може бути встановлений на борту літака, то контроль корпусів проводиться обслуговуючим обладнання літака техніком на землі, який тестує корпус подачею надлишкового тиску через кожні п'ять злетів і посадок. При цьому:

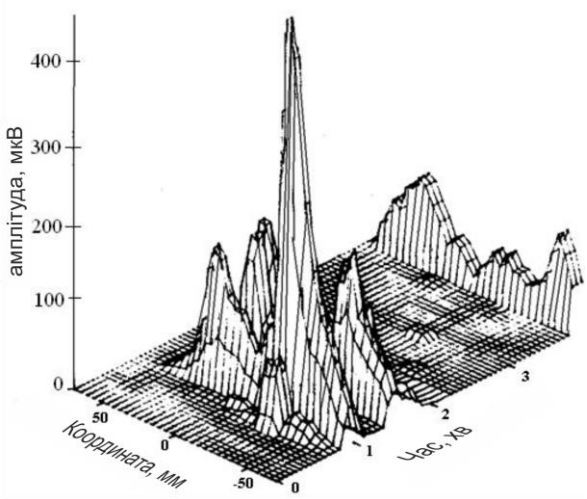


Рис. 3. Тривимірна діаграма зміни амплітуди сигналів АЕ залежно від часу

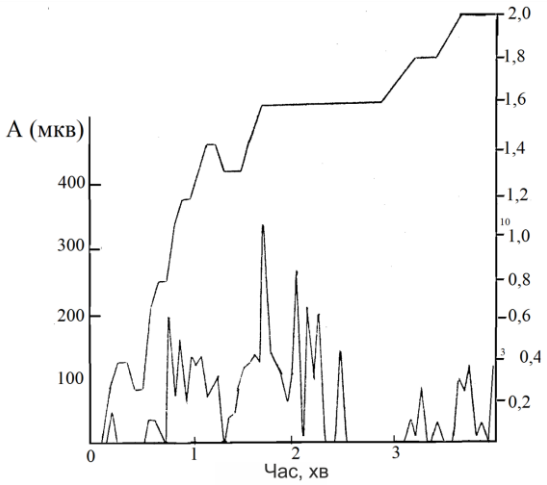


Рис. 4. Зміна амплітуди сигналів АЕ залежно від часу

– прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після першого циклу, тобто зльоту і посадки, свідчить про міцний і герметичний стан корпусу;

– якщо на *n*-м циклі з'являються сигнали АЕ, співмірні з виявленими на першому циклі, то це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування і такий корпус розгерметизується через шість-десять злетів і посадок.

Висновки

На основі отриманих результатів був запропонований засіб неруйнівного контролю міцності та попередження небезпечних станів корпусів мікроскладань НВЧ, встановлених на борту літака, в якому датчик АЕ служить датчиком безпеки на борту і за 6–10 циклів (тобто зльотів і приземлень) до катастрофічної руйнації корпусу «попереджає» про початок процесу руйнування. Також був спроектований і створений портативний АЕ-прилад, індикаторний пристрій якого сигналізує про наявність АЕ, яка перевищує заздалегідь установлений амплітудний рівень. Прилад містить один вимірювальний канал і реєструє сигнали АЕ у діапазоні 20–2000 кГц [10].

Література

1. Овечкин Р. М. Новые технологичные СВЧ устройства для перестраиваемых мощных плотноупакованных СВЧ схем и настроечные корпуса для них : дис. … канд. техн. наук : 05.12.07 / Овечкин Роман Михайлович – Казань, 2004. – 150 с.

2. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. – 2017. – P. 459–462.

3. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H-J. Chung // Journal of materials science. – 2016. – P. 2771–2805.

4. Grieu M. Durability modelling of a BGA component under random vibration / M. Grieu // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. – 2008. – P. 1–8.

5. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем / Максим Шмаков // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 6. – С. 64–68.

6. Хади О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3. – С. 41–48.

7. Хади О. Ш. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Динамика и прочность (глава 1). Избранные труды всеросс. научн. конф. по проблемам науки и технологий. – 2013.

8. Ham S. J. Thermal deformations of CSP assembly during temperature cycling and power cyclin / S. J. Ham, M. S. Cho S. B. Lee // International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000). IEEE. – 2000.

9. Ройзман В. П. Механика в электронике : Том 3 / В. П. Ройзман. – Хмельницкий : ХНУ, 2015.

10. Ройзман В. П. Розробка методик акусто-емісійної неруйнівної діагностики міцності деталей і вузлів техніки / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер.: Військові та технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 311–326.

11. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET'2012, February 21–24, 2012, Lviv–Slavske.

12. Емельянов В. Микроэлектронные СВЧ-компоненты на основе высокотемпературных сверхпроводников // Компоненты и технологии. – 2001. – № 6, № 7. – С. 34–41.

References

1. Ovechkin R. M. Novye tehnologichnye SVCh ustrojstva dlya perestraivaemyh moshnyh plotnoupakovannyh SVCh shem i nastroechnye korpusa dlya nih : dis. … kand. tehn. nauk : 05.12.07 / Ovechkin Roman Mihajlovich – Kazan, 2004. – 150 s.

2. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. 2017. – R. 459–462.

3. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H-J. Chung // Journal of materials science. 2016. – R. 2771–2805.

4. Grieu M. Durability modelling of a BGA component under random vibration / M. Grieu // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. 2008. – R. 1–8.

5. Shmakov M. Mikrosvarka pri proizvodstve mikrosborok i gibridnyh integralnyh mikroshem / Maksim Shmakov // Tehnologii v elektronnoj promyshlennosti. – 2006. – № 6. – S. 64–68.

6. Hadi O. Sh. Konstruktorsko-tehnologicheskie aspekty proektirovaniya mikrosborok, rabotayushih pri dinamicheskom nagruzhenii / O. Sh. Hadi, A. N. Litvinov, N. K. Yurkov // Nadezhnost i kachestvo slozhnyh sistem. – 2015. – № 3. – S. 41–48.

7. Hadi O. Sh. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korpusov mikrosborok v processe ih izgotovleniya i ekspluatacii / O. Sh. Hadi, A. N. Litvinov // Dinamika i prochnost (glava 1). Izbrannye trudy vseross. nauchn. konf. po problemam nauki i tehnologij. 2013.

8. Ham S. J. Thermal deformations of CSP assembly during temperature cycling and power cyclin / S. J. Ham, M. S. Cho S. B. Lee // International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000). IEEE. 2000.

9. Royzman V. P. Mehanika v elektronike : Tom 3 / V. P. Rojzman. – Hmelnickij : HNU, 2015.

10. Royzman V. P. Rozrobka metodyk akusto-emisiinoi neruinivnoi diahnostyky mitsnosti detalei i vuzliv tekhniky / V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Ser.: Viiskovi ta tekhnichni nauky. 2015. № 3. S. 311–326.

11. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET'2012, February 21–24, 2012, Lviv–Slavske.

12. Emelyanov V. Mikroelektronnye SVCh-komponenty na osnove vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov // Komponenty i tehnologii. – 2001. № 6, № 7. S. 34–41.

Рецензія/Peer review : 28.10.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Стаття прорецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-138-142
УДК 681.51: 664.65(045)

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, В.М. СЕРЕБРЕНИКОВ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, І.В. РАСЧЕХМАРОВ
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

УЛЬТРАЗВУК ЯК АНАЛІЗАТОР МОНІТОРИНГУ СТАНУ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

У статті розглянуто математичну модель взаємодії ультразвукових коливань з харчовою сировиною, яка представляє собою гетерогенне середовище. Припускаючи, що стан гетерогенного середовища описується математичною моделлю у вигляді диференціального рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, був проведений спектральний аналіз цього середовища за допомогою ультразвуку. Метою досліджень є пошук «передавальної функції» харчової сировини, за допомогою якої стало б можливим виявити структурні елементи харчової сировини – визначити її фізико-механічні властивості. Одержано формули, які дозволяють визначити параметри стану харчової сировини, за допомогою таких характеристик спектральної щільності, як резонансна частота, величина резонансу та добротність коливальної системи. Знайдені за допомогою ультразвукових коливань параметри дозволяють проводити безперервний моніторинг стану харчової сировини з метою оцінки її якості.

Ключові слова: ультразвук, харчова сировина, спектральна щільність, моніторинг, резонанс, добротність.

V.P. KHOROLSKY, V.M. SEREBRENIKOV, YU.M. KORENETS, I.V. RASCHEKHMAROV
Donetsk National Economy and Trade and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih

ULTRASOUND AS AN ANALYSER OF MONITORING OF THE STATE OF FOOD RAW MATERIALS

The article considers a mathematical model of the interaction of ultrasonic vibrations with food raw materials, which is a heterogeneous medium. Assuming that the state of a heterogeneous medium is described by a mathematical model in the form of a second-order differential equation with constant coefficients, a spectral analysis of this medium was carried out using ultrasound. The aim of the research is to search for the "transfer function" of food raw materials, with the help of which it would be possible to identify the structural elements of food raw materials – to determine its physical and mechanical properties. Formulas are obtained that allow one to determine the state parameters of food raw materials using spectral density characteristics such as resonance frequency, resonance value, and quality factor of the oscillatory system. The parameters found using ultrasonic vibrations allow continuous monitoring of the state of food raw materials in order to assess its quality.

Key words: ultrasound, food raw material, spectral density, monitoring, resonance, quality factor.

Постановка задачі

Сучасне харчове виробництво є складним технологічним процесом, який потребує ретельного контролю на кожній ланці переробки сировини. Від такого контролю залежить якість кінцевого продукту, що безпосередньо впливає на споживання продукту населенням. Аналіз процесів харчового виробництва показав, що методи контролю якості переробки сировини, які існують сьогодні, не завжди відповідають сучасним вимогам до якості продуктів. Внаслідок цього, від науковців потребується розробка нового обладнання, яке повинно використовувати сучасні підходи до методів контролю якості продуктів переробки харчової сировини. Одним із таких можливих підходів доцільно виділити застосування ультразвукових коливань з метою моніторингу якості переробки харчової сировини [1].

Аналіз досліджень та публікацій

Вивченню впливу ультразвуку на стан харчової сировини присвячені наукові праці відомих українських вчених: Г.В. Дейниченка, Г.М. Постнова, М.А. Чеканова, В.М. Червоного, Д.А. Нечипуренка [2, 3]. Вони довели, що в полі ультразвукових хвиль стан харчової сировини залежить від використання акустичних параметрів ультразвукової обробки (частоти, питомої енергії, тривалості обробки).

Це питання постає важливим для ідентифікації параметрів гетерогенного середовища і створення відповідних математичних моделей. Його рішення дозволить обґрунтувати раціональні параметри ультразвуку з метою ідентифікації властивостей харчової сировини. Таким чином, удосконалення застосування ультразвуку з метою оцінки якості харчової сировини є актуальним науково-технічним завданням і вимагає від науковців проведення додаткових досліджень, а саме, математичного моделювання процесу дії ультразвукових коливань на стан харчової сировини як гетерогенного середовища.

Формулювання цілей

Метою статті є ідентифікація стану харчової сировини за допомогою ультразвукових коливань для оцінки якості процесу її переробки з подальшою розробкою систем контролю та управління робототехнологічними комплексами виробництва харчових продуктів.

Виклад основного матеріалу дослідження

У нашому випадку харчова сировина, що досліджується, розглядається як гетерогенне середовище, що характеризується досить різноманітним складом.

Дистанційний контроль стану масиву харчової сировини за допомогою ультразвуку передбачає реконструкцію параметрів механічних явищ на підставі отриманих датчиками сигналів.

Метою досліджень є пошук «передавальної функції» масиву харчової сировини, за допомогою якої стало б можливим виявити структурні елементи масиву харчової сировини – визначити її фізико-механічні

властивості [4]. Згідно з наведеною на рис. 1 схемою, на масив харчової сировини діє деяке зовнішнє обурення *X (t)*. В результаті такого впливу масив харчової сировини змінює свій стан, починаючи коливатися, що підтверджується відповідною вихідною змінною $Y(t)$.

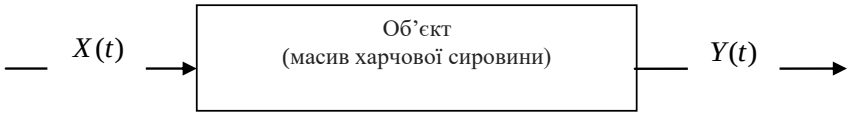


Рис. 1. Схема впливу зовнішнього обурення на масив харчової сировини

Таким чином, масив харчової сировини, показаний на рис. 1, представляється з точки зору кібернетики як «чорна скринька», внутрішній зміст якої або невідомий, або настільки складний, що не дозволяє побудувати адекватну модель, яка базується на фізико-механічних уявленнях [5].

Для дослідження об'єкта такого характеру необхідно, перш за все, визначити структуру математичної моделі. Під структурою в загальному випадку розуміється певне відношення між елементами, що складають об'єкт, який досліджується. У даному випадку в якості структурної категорії з точки зору динаміки об'єкта доцільно розглянути динамічну структуру об'єкта. Тому на першому етапі досліджень структуру передавальної функції, яка описує коливання харчової сировини, природно вибрати у вигляді лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами [6]:

$$\ddot{Y} + h \cdot \dot{Y} + k^2 \cdot Y = X(t), \tag{1}$$

де *Y(t)* – зміщення точок харчової сировини від рівноваги, м; *h, k* – числові параметри, пов'язані з властивостями харчової сировини, $1/\text{с}$, *X(t)* – зовнішній вплив на масив харчової сировини, $\text{м}/\text{с}^2$.

Відповідно до обраної структурі математичної моделі (1) при відхиленні точок харчової сировини від рівноваги виникає відновлювальна сила – $k^2 \cdot Y(t)$, пропорційна зміщенню *Y(t)*, і «сила гальмування» – $h \cdot \dot{Y}(t)$, пропорційна швидкості зміни відхилення $Y(t)$. Для стійкості процесу, який описується рівнянням (1), необхідно, щоб постійна була h додатною. У разі відсутності «зовнішньої сили» коливання масиву харчової сировини буде мати характер затухаючих коливань.

Необхідно підкреслити, що параметри *h* і *k* пов'язані з властивостями харчової сировини, які визначаються її спектральними характеристиками.

Вимірюючи спектр коливань харчової сировини для даного масиву харчової сировини та пов'язуючи його з параметрами *h* і *k*, які визначають спектр коливань моделі, можна провести аналіз масиву харчової сировини з метою його моніторингу.

Для знаходження спектральної щільності стаціонарного рішення диференціального рівняння (1) запишемо його в символічній формі:

$$Q_2(p)Y(t) = X(t), \tag{2}$$

де $Q_2(p) = p^2 + h \cdot p + k^2$ – поліном другого ступеня.

Підставимо в (2) спектральне розкладання $Y(t)$ [7]:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i \cdot \omega \cdot t} d\Phi(\omega), \tag{3}$$

де ω – частота коливань, $\text{рад}/\text{с}$, t – час, с.

$d\Phi(\omega)$ – приріст функції $\Phi(\omega)$, який відповідає приросту $d\omega$.

Оскільки в даному випадку функція, як функція, що має незалежні збільшення, є недиференційована, то запис інтеграла (3) у вигляді інтеграла Стілт'єса обов'язковий.

Користуючись тим, що похідні $Y(t)$ існують, продиференціюємо (3) під знаком інтеграла по t як по параметру:

$$\dot{Y}(t) = i\int_{-\infty}^{+\infty} \omega \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} d\Phi(\omega), \quad \ddot{Y}(t) = -\int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} d\Phi(\omega). \tag{4}$$

Підставляючи (4) в (2), отримуємо:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [-\omega^2 + h \cdot i\omega + k^2] e^{i \cdot \omega \cdot t} d\Phi(\omega) = X(t) \cdot \tag{5}$$

Обчислимо кореляційну функцію (5):

$$K_X(\tau) = M[X^*(t)X(t+\tau)] = M\{\int_{-\infty}^{+\infty} [-\omega_1{}^2 - h \cdot i\omega_1 + k^2] e^{-i\omega_1 \cdot t} d\Phi^*(\omega_1) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} [-\omega^2 + h \cdot i\omega + k^2] e^{i \cdot \omega(t+\tau)} d\Phi(\omega)\} \cdot$$

Представимо добуток інтегралів у вигляді подвійного інтеграла та змінимо порядок інтегрування і знаходження математичного очікування:

$$K_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [-\omega_1{}^2 - h \cdot i\omega_1 + k^2] \cdot [-\omega^2 + h \cdot i\omega + k^2] e^{i \cdot \omega(t+\tau) - i \cdot \omega_1 \cdot t} M[d\Phi^*(\omega_1) d\Phi(\omega)] \cdot \tag{6}$$

Враховуючи, що

$$M[d\Phi^*(\omega_1)d\Phi(\omega)] = S_Y(\omega)\delta(\omega-\omega_1)d\omega d\omega_1, \tag{7}$$

де $S_Y(\omega)$ – спектральна щільність $Y(t)$, $м^2/c^3$; $\delta(\omega-\omega_1)$ – дельта-функція Дірака, с; перетворимо (6) до вигляду:

$$K_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}[-\omega_1{}^2 - h\cdot i\omega_1 + k^2]\cdot[-\omega^2 + h\cdot i\omega + k^2]e^{i\cdot\omega(t+\tau)-i\cdot\omega_1\cdot t}S_Y(\omega)\delta(\omega-\omega_1)d\omega d\omega_1\cdot \tag{8}$$

З огляду на властивості дельта-функції Дірака, рівність (8) приводиться до виду:

$$K_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\cdot\omega\cdot\tau}\left| -\omega^2 + h\cdot i\omega + k^2 \right|^2 S_Y(\omega)d\omega\cdot \tag{9}$$

Кореляційна функція $K_X(\tau)$ та її спектральна щільність $S_X(\omega)$ пов'язані рівністю:

$$K_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\cdot\omega\cdot\tau}S_X(\omega)d\omega\cdot \tag{10}$$

Порівнюючи (9) і (10), знаходимо:

$$S_X(\omega) = \left|-\omega^2 + h\cdot i\omega + k^2\right|^2 S_Y(\omega)\cdot \tag{11}$$

Враховуючи, що рішення (2) має властивість стаціонарності, рівність (11) дозволяє виразити спектральну щільність вихідної змінної $Y(t)$ через спектральну щільність вхідного впливу $X(t)$:

$$S_Y(\omega) = \frac{S_X(\omega)}{\left|-\omega^2 + h\cdot i\omega + k^2\right|^2}\cdot \tag{12}$$

Перетворимо знаменник формули (12) :

$$\left|-\omega^2 + h\cdot i\omega + k^2\right|^2 = \left|(k^2-\omega^2) + h\cdot i\omega\right|^2 = (k^2-\omega^2)^2 + h^2\omega^2\cdot \tag{13}$$

Таким чином, згідно з (13), формула (12) набуває вигляду:

$$S_Y(\omega) = \frac{S_X(\omega)}{(k^2-\omega^2)^2 + h^2\omega^2}\cdot \tag{14}$$

Якщо вхідний сигнал має властивості «білого шуму», тобто

$$S_X(\omega) \approx C = const, \tag{15}$$

то формула (14) приймає вигляд

$$S_Y(\omega) = \frac{C}{(k^2-\omega^2)^2 + h^2\omega^2}\cdot \tag{16}$$

Перш за все, необхідно відзначити, що спектральна щільність (16) досягає максимальної величини, коли знаменник буде мінімальним, тобто при

$$\omega = k, \tag{17}$$

при цьому:

$$S_{Y\max} = \frac{C}{h^2k^2}\cdot \tag{18}$$

Таким чином, якщо в результаті вимірів спектральна щільність вихідної змінної $Y(t)$ досягає максимального значення $S_{Y\max}$ при $\omega = \omega_0$, то згідно з (17) і (18) шукані параметри, які входять в математичну модель, знаходяться за формулами:

$$k = \omega_0, \quad h = \frac{1}{\omega_0}\sqrt{\frac{C}{S_{Y_{max}}}}. \tag{19}$$

Таким чином, формули (19) дозволяють за максимальною величиною спектральної щільності (16) з урахуванням величини спектральної щільності «білого шуму», знайти величини параметрів k і h, які характеризують властивості масиву харчової сировини, що досліджується.

Необхідно підкреслити, що в реальних умовах однією з найважливіших характеристик спектральної щільності є добротність коливальної системи [8]. Ця характеристика визначається формулою:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \tag{20}$$

де ω_0 – резонансна частота, рад/с; $\Delta\omega$ - ширина смуги пропускання коливальної системи, рад/с.

Ширина смуги пропускання визначається як різниця верхньої і нижньої граничних частот, де амплітуда коливань дорівнює $\frac{1}{\sqrt{2}}$ від максимальної амплітуди. Згідно з (16) і (18) можна записати:

$$\frac{C}{(k^2-\omega^2)^2+h^2\omega^2}=\frac{C}{2h^2k^2},$$

або, з урахуванням того, що $k=\omega_0$, маємо:

$$\frac{1}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+h^2\omega^2}=\frac{1}{2h^2\omega_0^2}. \quad (21)$$

Формула (21) дозволяє знайти параметр h при відомій добротності коливальної системи (20). Враховуючи, що у формулі (21)

$$\omega=\omega_0+0,5\cdot\Delta\omega,$$

або, з урахуванням (20),

$$\omega=\omega_0(1+0,5\cdot\frac{\Delta\omega}{\omega_0}),\ \omega=\omega_0(1+\frac{1}{2Q}). \quad (22)$$

Згідно (22) формула (21) приймає вигляд:

$$\frac{1}{(\omega_0^2-\omega_0^2(1+\frac{1}{2Q})^2)^2+h^2\omega_0^2(1+\frac{1}{2Q})^2}=\frac{1}{2h^2\omega_0^2},$$

або, після скорочення,

$$\frac{1}{\omega_0^2\frac{(4Q+1)^2}{16Q^4}+h^2(1+\frac{1}{2Q})^2}=\frac{1}{2h^2}. \quad (23)$$

Перетворюючи (23), послідовно отримуємо:

$$\omega_0^2\frac{(4Q+1)^2}{16Q^4}+h^2\left(1+\frac{1}{2Q}\right)^2=2h^2,\ h^2\left(2-\left(1+\frac{1}{2Q}\right)^2\right)=\omega_0^2\frac{(4Q+1)^2}{16Q^4},$$

$$h^2=\omega_0^2\frac{(4Q+1)^2}{16Q^4(2-\left(1+\frac{1}{2Q}\right)^2)},$$

і, остаточно,

$$h=\omega_0\frac{4Q+1}{4Q^2\sqrt{2-\left(1+\frac{1}{2Q}\right)^2}}. \quad (24)$$

Формула (24) дозволяє знайти параметр h при відомій добротності коливальної системи Q і резонансної частоті ω_0.

Таким чином, формули

$$k=\omega_0 \text{ и } h=\omega_0\frac{4Q+1}{2\sqrt{4Q^2-4Q-1}} \quad (25)$$

дозволяють визначити параметри харчової сировини за характеристиками резонансу спектральної щільності ультразвуку.

Висновки

Математичне моделювання стану харчової сировини як гетерогенного середовища з відповідними фізико-механічними властивостями дозволило шляхом зовнішнього впливу у вигляді ультразвукових коливань проводити моніторинг стану цієї сировини з метою оцінки її якості. Підтримання якості стану харчової сировини на заданому рівні дозволить, завдяки оперативному її контролю, покращати кінцевий продукт. Для практичної реалізації результатів математичного моделювання необхідно провести серію експериментів, які б дозволили оцінити спектральні характеристики стану харчового продукту, що відповідає еталону необхідної якості.

Література

1. Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков // Алтайский государственный технический университет БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.

2. Отримання водно-жирових емульсій за допомогою ультразвуку : монографія / Г.В. Дейниченко [та ін.]. – Харків : ФАКТ, 2013. – 192 с.

3. Безвідхідна переробка м'яса з високим вмістом сполучної тканини з використанням ультразвуку : монографія / Г.В. Дейниченко [та ін.] – Харків : ФАКТ, 2012. – 192 с.

4. Акопян Б.В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / Б.В. Акопян. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 224 с.

5. Лапыгин Ю.Н. Теория организации / Лапыгин Ю.Н. – М. : Инфра-М, 2007. – 311 с.

6. Фомин В.И. Дифференциальные уравнения : учебное пособие / Фомин В.И. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 156 с.

7. Волков И.К. Случайные процессы : учеб. для вузов / И.К. Волков, С.М. Зуев, Г.М. Цветкова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 448 с.

8. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / Бидерман В.Л. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.

References

1. Hmelev V.N. Primenenie ultrazvuka vysokoj intensivnosti v promyshlennosti / V.N. Hmelev, A.N. Slivin, R.V. Barsukov // Altajskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet BTI. – Bijsk : Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta, 2010. – 203 s.

2. Otrymannia vodno-zhyrovykh emulsii za dopomohoiu ultrazvuku : monohrafiia / H.V. Deinychenko [ta in.]. – Kharkiv : FAKT, 2013. – 192 s.

3. Bezvidkhidna pererobka miasa z vysokym vmistom spoluchnoi tkanyny z vykorystanniam ultrazvuku : monohrafiia / H.V. Deinychenko [ta in.] – Kharkiv : FAKT, 2012. – 192 s.

4. Akopyan B.V. Osnovy vzaimodejstviya ultrazvuka s biologicheskimi obektami / B.V. Akopyan. – M. : MGTU im. N.E. Baumana, 2005. – 224 s.

5. Lapygin Yu.N. Teoriya organizacii / Lapygin Yu.N. – M. : Infra-M, 2007. – 311 s.

6. Fomin V.I. Differencialnye uravneniya : uchebnoe posobie / Fomin V.I. – Tambov : Izd-vo GOU VPO TGTU, 2010. – 156 s.

7. Volkov I.K. Sluchajnye processy : ucheb. dlya vuzov / I.K. Volkov, S.M. Zuev, G.M. Cvetkova. – M. : Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1999. – 448 s.

8. Biderman V.L. Teoriya mehanicheskih kolebanij / Biderman V.L. – M. : Vysshaya shkola, 1980. – 408 s.

Рецензія/Peer review : 11.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Зеленський О.С.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-143-148
УДК 621.396.9

В.Р. ЛЮБЧИК, В.І. СТЕЦЮК, О.С. КАРПІНСЬКИЙ, В.П. НЕЗДОРОВІН
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ І СПЕКТРОЗОНАЛЬНИХ ДАНИХ

В роботі розглянута математична модель формування зображень в радіолокаторах із синтезованою апертурою. Сформована модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Здійснюється визначення питомої ефективної площі розсіювання та комплексної функції відбивання. Розглянуто питання впливу поляризації на обробку радіолокаційних зображень. В моделі формування зображень враховано додаванням адитивного випадкового шуму та мультиплікативної завади у вигляді спекл-шуму, який, в свою чергу, може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА. Побудована математична модель фрактального методу оцінки радіолокаційних зображень з використанням функції спостережуваного сигналу, функції випадкового шуму, текстурної функції цілі та текстурної функції фону. Встановлено, що визначення фрактальних властивостей областей і об'єктів, присутніх на зображеннях, одержуваних в системах космічного спостереження, можливе тільки при обчисленні локальної фрактальної розмірності.

***Ключові слова**: радіолокація, дистанційне зондування Землі, поляризація, синтезована апертура, математична модель, зображення, фрактал, розмірність.*

V.R. LUBCHIK,V.I. STETSIUK, O.S. KARPINSKY, V.P. NEZDOROVIN
Khmelnytskyi National University

FRACTAL PROCESSING METHODS FOR RADAR AND SPECTROZONAL DATA

Currently available textural analysis methods are widely used in image processing problems in Earth remote sensing systems, but the question remains of the application of fractal geometry methods in radar imaging problems in radars with synthesized aperture, especially with low contrast objects present on them. The study of the applicability of fractal theory methods in the problem of detecting low-contrast targets on radar images, as well as options for improving the efficiency of such detection by applying a complex approach is an urgent scientific task. To solve it requires an analysis of the processing of various natural and anthropogenic scenes obtained in the systems of remote sensing. The mathematical model of image formation in radars with synthesized aperture is considered. The formed model of the scene obtained in RSA is a space of two-dimensional backscattering functions, uniquely corresponding to the space of objects located on the surface being taken. The specific effective scattering area and the complex reflection function are determined. The influence of polarization on the processing of radar images is considered. In the imaging model, account is taken of the addition of additive random noise and multiplicative interference in the form of speckle noise, which in turn can be used to identify spatially distributed objects and evaluate the characteristics of PCA. A mathematical model of the fractal method of estimating radar images using the observed signal function, random noise function, textural objective function and textural background function is constructed. It is established that the determination of fractal properties of regions and objects present in images obtained in space surveillance systems is possible only when calculating the local fractal dimension. We form the following successive steps of the process of fractal processing of radar images: construction of a field of fractal dimensions of a multichannel radar image; threshold processing of fractal dimension fields; clustering of radar image by fractal dimension field.

***Keywords**: radar, remote sensing, polarization, synthesized aperture, mathematical model, image, fractal, dimension.*

Вступ

Методи та апаратура радіолокаційного зондування Землі на сьогоднішній день розвиваються досить швидкими темпами, особливо бортові радіолокатори із синтезом апертури (РСА). Дані технічні засоби здійснюють зондування земної поверхні в будь-який час доби, та пори року і не залежать ні від кліматичних умов, ні від наявності хмарності, що вигідно відрізняє їх від систем оптичного діапазону. Сучасна реалізація космічних (РСА) може забезпечити просторове розрізнення знімків до часток метра, що дозволяє вирішувати задачу радіобачення не тільки у всепогодності, але і в можливості виявлення і розпізнавання об'єктів спостереження за радіолокаційним контрастом, селекції рухомих наземних (надводних) об'єктів. В подібних системах використовується багаточастотне поляриметричне зондування з вимірюванням амплітудних і фазових відмінностей відбитих сигналів. Широко застосовується інтерферометрична обробка даних радіолокаційного зондування для отримання детальних тривимірних портретів об'єктів спостереження, стаціонарних і рухомих, виявлення змін, викликаних природними, техногенними та антропогенними факторами. Проблематика даного питання в першу чергу відноситься до задачі виявлення і визначення границь слабко відбиваючих об'єктів, а також об'єктів, відбивні властивості яких близькі (малоконтрасні протяжні цілі). При автоматизованій обробці космічних РЛЗ для її вирішення в даний час найчастіше використовуються статистичні, спектральні і контурно-текстурні методи. Широко поширені методи виділення границь на основі радіояскравісного контрасту, отримані на основі методів Лапласа, Уоллеса і Кірша, а також алгоритм Кенні [1]. Однак ці методи виявляються малоефективними при вирішенні завдань виявлення неоднорідностей малоконтрасних об'єктів. Перспективними в цьому плані слід вважати фрактальні методи. В рамках цього підходу зображення розглядаються не як сукупність окремих елементів з певними характеристиками, а як деяка структура, що володіє внутрішніми топологічними, а отже і кореляційними зв'язками між елементами і характеризує складний і протяжний об'єкт в цілому. Численні

дослідження і експерименти з аналізу зображень природних поверхонь в різних діапазонах просторових масштабів показали, що в більшості випадків вони мають фрактальні властивості [2, 3]. Зокрема, фрактальна розмірність, яка кількісно оцінює складність і хаотичний характер природних текстур, може бути використана в якості ефективної ознаки сегментації РЛЗ. Однак ряд питань фрактальної обробки космічних радіолокаційних зображень опрацьовано недостатньо. Зазначені вище фактори дозволяють говорити про необхідність проведення додаткових досліджень з розробки та аналізу фрактальних методів і алгоритмів обробки РЛЗ з метою підвищення дешифрувальних властивостей радіолокаційних зображень в системах космічного спостереження.

а)

б)

Рис. 1. Схожість реальних фрагментів рельєфу місцевості на фрактальні структури: а) гірський хребет Кондер, б) Австралія

Основна частина

Радіолокаційне виявлення малопомітних і малогабаритних об'єктів поблизу поверхні землі і моря представляє вкрай важку задачу. Різноманітність підстилаючих поверхонь, умов радіолокаційного спостереження і супроводу вищевказаних об'єктів часто призводить до того, що відношення сигнал/шум для таких завдань майже завжди заповнює область від’ємних (в децибелах) значень. Це робить непридатним класичні радіолокаційні методи і алгоритми виявлення в більшості випадків, тобто використання енергетичних виявників стає неможливим. У зв'язку з цим подальший розвиток теорії виявлення на основі аналізу фрактальних властивостей зображень призвів до появи моделі фрактального виявника, який дозволяє здійснювати пошук штучних об'єктів на фоні фрактальних підстилаючих поверхонь. Модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання $\rho(x, y)$, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Функція зворотного розсіювання $\rho(x,y)$ являє собою комплексну функцію, відповідну локальній матриці розсіювання поля, відбитого від об'єкта в заданому поляризаційному базисі при фіксованих значеннях всіх інших характеристик поля опромінення:

$$\rho(x,y) = \lim_{R\to\infty} \sqrt{4\pi} R \frac{E(x,y)}{E_0(x,y)}, \tag{1}$$

де $E(x, y)$ – величина електричної складової розсіяного електромагнітного поля, заміряна гіпотетичним спостерігачем, $E_0(x, y)$ – величина електричної складової падаючого електромагнітного поля. Потужність відбитого поля визначається ефективною площею розсіювання:

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \left|\frac{E}{E_0}\right|^2. \tag{2}$$

Тому функція зворотного розсіювання пов'язана з ефективною площею розсіювання відбивача наступним чином:

$$\rho(x,y) = \sqrt{\sigma(x,y)} \cdot e^{j\varphi(x,y)}, \tag{3}$$

де $\varphi(x, y)$ – зміна фази хвилі при її відбиванні. Тоді функція відбивання об'єкта визначається залежністю коефіцієнта розсіювання від координат точкових відбивачів i-го об'єкту:

$$\rho_i = \sqrt{\sigma} \cdot e^{j\varphi_i}. \tag{4}$$

У разі гладких неоднорідностей використовується модель об'єкта у вигляді P просторово-розподілених блискучих точок, і функція зворотного розсіювання представляється сумою дельта-функцій:

$$\rho(x,y) = \sum_{p=1}^{P} \rho_p \delta(x - x_p, y - y_p), \tag{5}$$

де $\rho_p = \sqrt{\sigma_p} \cdot e^{j\varphi_p}$ – коефіцієнт зворотного розсіювання точкового відбивача.

Просторово розподілені об'єкти мають однорідну відбивну здатність в межах деякої ділянки (поле, ліс, водна поверхня, дорога, тощо). Відбиваюча здатність таких об'єктів характеризується питомою ефективною площею розсіювання, яка визначається як відношення ефективної площі розсіювання елемента розрізнення на місцевості до значення його геометричної площі:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{\delta x \cdot \delta y} \tag{6}$$

Важливою властивістю РСА, яка істотно впливає на одержувані зображення, є поляризація радіосигналів при передачі і прийомі [2]. В однополяризаційних РСА прийом ведеться з узгодженими вертикальною (*VV*), горизонтальною (*HH*) або круговою поляризаціями. У поляриметричних РСА використовуються два приймальних і два передавальних канали з горизонтальною і вертикальною поляризаціями, що дозволяють порівнювати сигнали з будь-якими комбінаціями поляризацій при передачі і прийомі. В цьому випадку, для визначення комплексної функції відбивання використовується повна поляризаційна матриця, яка описує перетворення амплітуди, фази і поляризації хвилі, опромінюючої ціль, при її відбиванні від цілі:

$$\hat{\rho} = \begin{vmatrix} \sqrt{\sigma_{HH}} \cdot e^{j\varphi_{HH}} & \sqrt{\sigma_{HV}} \cdot e^{j\varphi_{HV}} \\ \sqrt{\sigma_{VH}} \cdot e^{j\varphi_{VH}} & \sqrt{\sigma_{VV}} \cdot e^{j\varphi_{VV}} \end{vmatrix}, \tag{7}$$

де $\sqrt{\sigma_{HH}}$, $\sqrt{\sigma_{HV}}$, $\sqrt{\sigma_{VH}}$, $\sqrt{\sigma_{VV}}$ – елементи матриці розсіювання, що характеризують амплітуду відбитого сигналу, φ_{HH}, φ_{VH}, φ_{HV}, φ_{VV} – відповідні фази.

Поляризація впливає на контраст об'єктів, збільшуючи його в напрямку, що збігається з напрямком поляризації. Вплив вибору поляризації показано на рис. 2.

а) **б)**

Рис. 2. Фрагмент синтезованого знімка: а) *VV* поляризація, б) *VH* поляризація

Прийняте РСА поле на всій траєкторії носія РЛС формує траєкторний сигнал, який включає в себе різного роду перешкоджаючі сигнали від сторонніх джерел перешкод і внутрішні шуми:

$$U_T(\xi,\eta) = U_r(\xi,\eta) + \beta(\xi,\eta) \tag{8}$$

де $U_T(\xi, \eta)$ – спостережуваний сигнал, $U_r(\xi, \eta)$ – відбитий сигнал, прийнятий на ділянці траєкторії, $\beta(\xi, \eta)$ – шуми і перешкоди.

Прийнятий сигнал від протяжної цілі є результат лінійного перетворення функції відбивання:

$$U_T(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \rho(x,y) U_1(\xi - x, \eta - y)\,dxdy\,, \tag{9}$$

де $U_1(\xi\text{-}x, \eta\text{-}y)$ – сигнал від одиночної точкової цілі, $\rho(x, y)$ – функція відбивання.

Метою завдання обробки радіолокаційного сигналу є відновлення функції зворотного розсіювання $\rho(x,y)$. Функція зворотного розсіювання міститься в прийнятому сигналі у вигляді невідомої функції підінтегрального виразу. Завдання формування зображення в радіолокаційних системах (так само як і в оптико-електронних) є окремим випадком завдання відновлення зображення. Модель формування зображень представляється наступним виразом:

$$g(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) h(\xi,\eta,x,y)\,dxdy\,, \tag{10}$$

тут $g(\xi, \eta)$ – сформоване системою зображення (РЛС або оптичною), $f(x, y)$ – поле відбивання досліджуваного об'єкта. Функція Гріна (або апаратна функція) $h(\xi, \eta, x, y)$ в даному виразі має зміст реакції системи формування на імпульсний вхідний вплив $\delta(x\text{-}x_0, y\text{-}y_0)$ і повністю характеризує систему формування зображення. У радіолокації функцією Гріна $h(\xi, \eta, x, y)$ є реакція системи на точковий відбивач, розташований в точці (ξ, η), в оптиці – на точковий яскравий об'єкт в точці з цими ж координатами. Інтегральне рівняння Фредгольма (10) справедливе тільки для лінійних систем формування зображень. Попри те, що більшість реальних систем є принципово нелінійними, часто доводиться вдаватися до різних методів лінеаризації початкових рівнянь і потім проводити дослідження в класі лінійних систем, що дозволяє використовувати (10) як загальний вираз для спостережуваного зображення з додаванням адитивного випадкового шуму – $\beta(\xi, \eta)$, неминучого в реальному фізичному пристрої.

$$g(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) h(\xi,\eta,x,y)\,dxdy + \beta(\xi,\eta)\,. \tag{11}$$

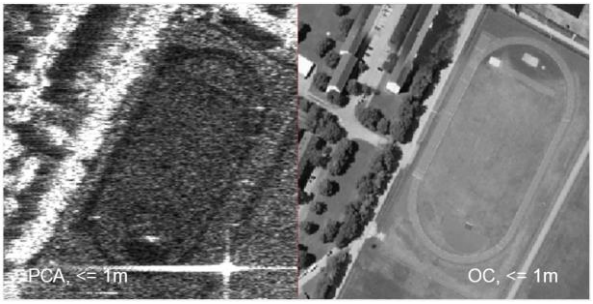


Рис. 3. Радіолокаційне зображення, що містить характерний спекл-шум (зліва)

Специфічною особливістю радіолокаційних зображень, отриманих в РСА є наявність спекл-шуму (рис. 3), який викликаний інтерференцією елементарних відбивачів від однорідних протяжних об'єктів. Принциповим в утворенні спекл-шуму є співвідношення розмірів об'єкта і розміру елемента розрізнення, який формується при когерентній обробці сигналу. Спекл-шум може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА, і, в той же час, наявність спекл-шуму призводить до погіршення дешифрованості радіолокаційних зображень, радіометричного розрізнення і точності вимірювання компонентів радіолокаційного портрету об'єкта. Таким чином, задача обробки зображення зводиться до найбільш точного відновлення функції $f(x,y)$. Для цієї мети необхідно пригнічувати мультиплікативну шумову складову – спекл-шум. Існуючі методи зниження спекл-шуму поділяються на такі основні напрями: додавання незалежних радіолокаційних зображень, використання глобальних алгоритмів фільтрації (алгоритми Вінеровської і Калмановської фільтрації, геометрична фільтрація, тощо) та використання локальних алгоритмів (метод локальних статистик, сигма-фільтр, локальна адаптивна фільтрація, метод Фроста).

Рис. 4. Класифікація методів виділення границь

При аналізі протяжних цілей результатом дешифрування є розбиття вихідного зображення на однорідні області з оцінкою їх статистичних характеристик, що дозволяють коректно відносити такі області до певних класів. Отримувані радіолокаційні зображення можуть містити в різному ступені виражену границю між окремими областями з різним контрастом, тому крім рішення задачі виявлення та оцінки параметрів таких границь істотну роль відіграє аналіз пропонованих алгоритмів її виділення. Основні методи виділення границь можна класифікувати наступним чином (рис. 4).

Однак в загальному випадку при обробці протяжних областей, особливо, якщо вони мають близькі значення статистичних характеристик, застосування класичних алгоритмів виявлення і розпізнавання не завжди можливе. В основі нових інформаційних технологій виявлення і розпізнавання об'єктів в складній обстановці із завадами розвиток отримали методи з використанням текстур (фрактальна обробка, основана на теорії детермінованого хаосу і дробової розмірності), методи комплексування радіолокаційної інформації з даними інших знімальних систем, наприклад в оптичному діапазоні. Застосування методів фрактальної обробки передбачає використання моделі зображення, що враховує самоподобу природних текстур в різних масштабах. Результати обробки зображень, отриманих на різних довжинах хвиль в різних масштабах, свідчать про те, що області зображень, відносяться до різних класів природних утворень, зберігають свої стохастичні характеристики, не дивлячись на масштаб зображення, і можуть бути досліджені з використанням теорії фракталів. Використання фрактальних методів обробки космічних зображень (побудова поля фрактальних розмірностей) дозволяє розділяти різні типи природних і антропогенних структур і об'єктів, таких як границі море-лід, межі берегової лінії, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя з різними культурами тощо. Особливістю фрактальних методів є те, що при обробці спектрозональних і радіолокаційних зображень місцевості вдається описати унікальність спостережуваного об'єкта за допомогою одного параметра – фрактальної розмірності, що дає можливість здійснити попереднє автоматичне сегментування аналізованого зображення шляхом виділення кластерів заданого діапазону значень фрактальних розмірностей.

При радіолокаційному зондуванні корисний сигнал від цілі $s_T(\vec{x})$ є частиною загального зображення, створюваного всіма відбиваючими елементами спостережуваних фрагментів фону, який оточує ціль, тому на практиці сигнали від елементів утворюють завадову складову. Шукана ціль затінює ділянку фону, тому припущення про адитивність корисного сигналу $s_T(\vec{x})$ і фону оправдане тільки, коли ціль

займає незначну частину зображення. У зв'язку з цим модель реальних зображень виявляється складнішою за просту радіотехнічну модель адитивного складання сигналу і шуму виду (8).

Вважаючи, що в області аналізу A задані функції:

– $U_T(\vec{x})$ – функція спостережуваного сигналу $\vec{x} \in A$;

– $s_T(\vec{x})$ – функція цілі ($\vec{x} \in A_S$, $A_S \subset A$),

– $n(\vec{x})$ – функція випадкового шуму ($\vec{x} \in A$),

– $g(\vec{x})$ – текстурна функція навколо цілі ($\vec{x} \in A - A_S$),

при тому, що

$$g(\vec{x}) \to \begin{cases} \geq 0, \vec{x} \in A - A_S, \\ = 0, \vec{x} \in A_S \end{cases} \tag{12}$$

одержуємо, що модель аналізованого зображення з урахуванням середовища поширення зводиться до виду

$$U_T(\vec{x}) = \varepsilon\left[g_0 + s_T(\vec{x})\right] + g(\vec{x})n(\vec{x}), \tag{13}$$

де ε – рівень мультиплікативних перешкод, g_0 – постійна складова, яка визначається середнім рівнем контрасту і забезпечує умову $U_T(\vec{x}) \geq 0$.

Встановлення інваріантності фрактальної розмірності зображень природних утворень від їх яскравості стало основною передумовою для переходу до фрактальної обробки складних зображень: будь-яка детермінована ціль у фізично охоплюваних масштабах спостереження залишається практично незмінною, і оцінка її геометричних характеристик прагне до певного межі. У той же час, при зміні масштабу зображення місцевості площа фрактальних утворень відповідно змінюється, тому поява на будь-якому зображенні деякої штучної цілі змінює величину фрактальної розмірності зображення в цілому. У разі протяжних цілей, одержуваних РСА, модель радіолокаційного зображення повинна бути доповнена. Протяжний об'єкт сам по собі може мати фрактальний характер, крім цього обов'язковий в РСА спекл-шум має фрактальні властивості, тому в виразах (12) і (13) повинні бути враховані фрактальні властивості протяжного об'єкта:

$$g_B(\vec{x}) \to \begin{cases} \geq 0, \vec{x} \in A - A_S, \\ = 0, \vec{x} \in A_S \end{cases} \tag{14}$$

$$g_T(\vec{x}) \to \begin{cases} \geq 0, \vec{x} \in A_S, \\ = 0, \vec{x} \in A - A_S \end{cases} \tag{15}$$

$$U_T(\vec{x}) = \varepsilon\left[g_0 + g_T(\vec{x})s_T(\vec{x})\right] + g_B(\vec{x})n(\vec{x}), \tag{16}$$

де $g_T(\vec{x})$ – текстурна функція цілі ($\vec{x} \in A_S$), $g_B(\vec{x})$ – текстурна функція фону ($\vec{x} \in A - A_S$).

При проведенні фрактального аналізу необхідно враховувати той факт, що досліджуване зображення може складатися з фрагментів, що мають різні оцінки розмірності. Тому при проведенні фрактальної обробки зображень, що містять різні природні текстури, потрібне проведення віконної обробки зображення з обчисленням в пропонованому вікні локальної фрактальної розмірності. В цьому випадку, результатом обробки зображення є побудова поля фрактальної розмірності, при якому кожному пікселю зображення ставиться у відповідність значення D (дробова розмірність Хаусдорфа-Безиковича). Поняття дробової розмірності тісно пов'язане з топологічної розмірністю D_0 (це звичайна геометрична розмірність). Фрактали можна розглядати як множину точок, вкладених у простір. Зокрема, точка має топологічну розмірність D_0=0. Гладкі криві (окружності, прямі) – D_0=1. Розмірність поверхні D_0=2, об'ємних тіл D_0=3, гіпертіл D_0>3. Розмірність Хаусдорфа узагальнює поняття розмірності дійсного векторного простору, і є природним способом визначення розмірності підмножини в метричному просторі. Наприклад розмірність Хаусдорфа n-мірного (розмірність в сенсі векторного простору) унітарного простору (особливий випадок векторного простору) буде теж дорівнює n. Уявімо повне покриття множини X кулями радіусу r, позначивши кількість цих куль за $N(r)$, рис. 5. Значення $N(r)$ буде рости при зменшенні r (для повного покриття буде потрібно все більше куль). Розмірністю Хаусдорфа "хорошої" множини X буде таке унікальне число d, що $N(r)$ буде рости як $1/r^d$ при прагненні r до нуля. Під "хорошою" множиною розуміються гладкі множини без особливостей, якими наприклад володіють фрактали. Прикладами хороших множин можуть бути будь-які ідеалізовані геометричні об'єкти такі як куб, сфера, тощо.

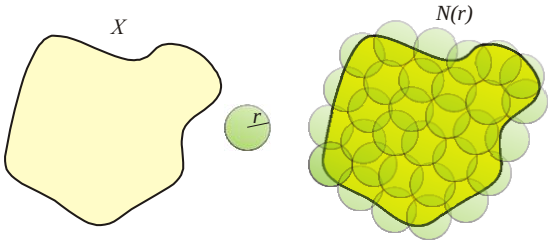


Рис. 5. Графічне пояснення розмірності

Візьмемо деяку D-мірну геометричну структуру і будемо ділити ітеративно її сторони на M рівних частин (на наступній ітерації, будемо ділити кожну отриману на попередній ітерації частина так само на M частин). Кожен рівень буде складатися з M^D частин попереднього рівня. Позначимо наступним чином кількість отриманих частин $N=M^D$. Виконаємо наступне перетворення для обчислення формули для значення фрактальної розмірності D:

$$N = M^D \Rightarrow log\,N = log\,M^D \Rightarrow D = \frac{log\,N}{log\,M} \quad (17)$$

Наприклад, для кривої Коха (рис. 6) M=3, тому що відрізок ділиться на три рівні частини, а N=4, тому що кожна частина перетворюється в 4 частини рівних 1/4 від оригіналу. Тоді фрактальна розмірність такої множини при нескінченній кількості ітерацій буде дорівнювати наступним значенням:

$$D = \frac{log\,N}{log\,M} = \frac{log\,2^2}{log\,3} = \frac{2\,log\,2}{log\,3} \approx 1{,}26$$

Для трикутника Серпінського (рис. 7) на кожній ітерації одна сторона ділиться на 2 частини, тобто M=2, а в результаті виходить 3 частини, тобто N=3, тоді

$$D = \frac{log\,3}{log\,2} \approx 1{,}58$$

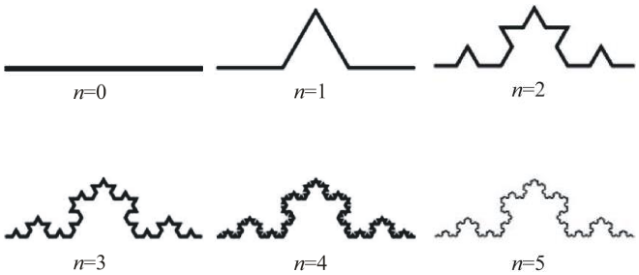


Рис. 6. Побудова тріадної кривої Коха

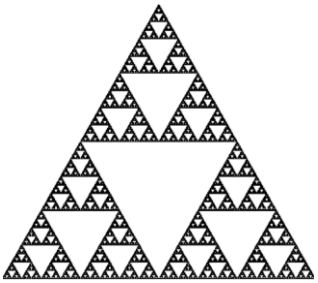


Рис. 7. Трикутник Серпінського

Висновки

В роботі розглянута математична модель формування зображень в радіолокаторах із синтезованою апертурою. Сформована модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Здійснюється визначення питомої ефективної площі розсіювання та комплексної функції відбивання. Розглянуто питання впливу поляризації на обробку радіолокаційних зображень. В моделі формування зображень враховано додаванням адитивного випадкового шуму та мультиплікативної завади у вигляді спекл-шуму, який в свою чергу, може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА. Побудована математична модель фрактального методу оцінки радіолокаційних зображень з використанням функції спостережуваного сигналу, функції випадкового шуму, текстурної функції цілі та текстурної функції фону. Встановлено, що визначення фрактальних властивостей областей і об'єктів, присутніх на зображеннях, одержуваних в системах космічного спостереження, можливо тільки під час обчислення локальної фрактальної розмірності.

Література

1. Гонсалес Р. С. Цифровая обработка изображений / Р. С. Гонсалес, Р. Е. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Научная серия «Системы мониторинга воздушного космического пространства и земной поверхности» / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.

3. Неронский Л. Б. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны : учеб. пособие / Л. Б. Неронский, В. Ф. Михайлов, И. В. Брагин. – СПб, 1999. – Ч. 2. – 220 с.

References

1. Gonsales R. S. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / R. S. Gonsales, R. E. Vuds. – M. : Tehnosfera, 2005. – 1072 s.

2. Verba V. S. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. Nauchnaya seriya «Sistemy monitoringa vozdushnogo kosmicheskogo prostranstva i zemnoj poverhnosti» / V. S. Verba, L. B. Neronskij, I. G. Osipov, V. E. Turuk. – M. : Radiotehnika, 2010. – 680 s.

3. Neronskij L. B. Mikrovolnovaya apparatura distancionnogo zondirovaniya poverhnosti Zemli i atmosfery. Radiolokatory s sintezirovannoj aperturoj antenny : ucheb. posobie / L. B. Neronskij, V. F. Mihajlov, I. V. Bragin. – SPb, 1999. – Ch. 2. – 220 s.

Рецензія/Peer review : 24.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Стаття прорецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-149-154
УДК 621.398

О.С. ПИВОВАР, О.О. МИХАЛЬЧУК, І.О. ВЕРЕМІЙЧУК
Хмельницький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЬОЇ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Показана можливість використання властивостей сигналів детермінованого хаосу для завдань вимірювання та контролю ближніх відстаней. Запропоновано ряд моделей систем ближньої навігації мобільних роботів на пласких поверхнях із перешкодами на основі застосування генераторів детермінованого хаосу та їх взаємодії під час односпрямованої хаотичної синхронізації. Аналіз запропонованих моделей підтверджує теоретичні обґрунтування щодо збільшення рівня прихованості дії, завадостійкості в умовах адитивних шумових завад та роботи групи подібних систем у складі рою.

Ключові слова: хаос, навігаційні системи, генератор сигналів детермінованого хаосу, хаотична синхронізація.

O. S. PYVOVAR, O. O. MYKHALJCHUK, I. O. VEREMIJCHUK
Khmelnytskyi National University

APPLICATION OF DETERMINED CHAOS SIGNALS IN SHORT-RANGE NAVIGATION SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTS

The widespread use of drones as autonomous mobile systems for the production, transport, service, and combat missions requires effective navigation systems in order for them to function effectively in environments with numerous obstacles. Most mobile navigation problems appear in situations when groups of drones are used in a swarm. Solving such problems is linked to the need for the development of orientation systems; such process organically combines the task of measuring and controlling the distance to the obstacles surrounding the mobile mechanism while ensuring the concealment of action and protection against interference. A complex solution to such problems is possible through the use of nonlinear dynamic systems with a chaotic mode of operation in different ways of interaction with the environment and similar navigation systems. The possibility of using deterministic chaos signals to measure and control physical quantities is considered. The classification scheme of features of measuring process in nonlinear dynamic systems with chaotic modes of operation is offered. A number of parameters and characteristics of chaotic generators which should be used in the measurement process are highlighted, their classification is proposed. It is proposed to use 4D deterministic chaos generators for use in short-range drone navigation in two-dimensional plane. Comparative analysis of correlation properties of several 3D and 4D chaotic generators is carried out. The phase variables of the deterministic chaos generators are selected, which correspond to the tasks of navigation on the basis of phase trajectory divergence. It is proposed to use the principles of chaotic synchronization to build a system of short-range navigation of mobile mechanisms in the plane in order to enhance the ability to control the movement of drones in conditions of multi-channel interference and increase noise immunity in drone navigation systems. Computer simulation of the process of synchronization of chaotic generators of Qi-Chen during change of degree of one-way link between the driving and driven chaotic generators, changes of control parameters of the evolution operator in a nonlinear dynamic system, and signal-to-noise ratio of additive interferences is carried out.

Keywords – chaos, navigation systems, generator of signals of deterministic chaos, chaotic synchronization.

Постановка проблеми

Детермінований хаос являє собою надзвичайно поширене та різноманітне явище, що полягає у появі в нелінійних динамічних систем (НДС) неперіодичних процесів з неперервним спектром потужності [1]. Відкриття Е. Лоренцом явища динамічного хаосу в 1961 р і його подальші дослідження стали справжньою науковою революцією наприкінці XX століття. Це привернуло увагу фахівців з різних галузей знань своєю елегантністю, широким поширенням у природних та штучних процесах, відносною простотою динамічних математичних моделей, на яких його можна досліджувати чисельним шляхом [2].

Перспективи застосування сигналів детермінованого хаосу (СДХ) пов’язані, у першу чергу, із широкосмуговістю таких сигналів, але перевагою СДХ є не лише широкосмуговість спектру, але і можливість досягнення цієї широкосмуговості для значної тривалості. Тобто генератор хаотичних сигналів (ГХС) створює сигнал із високою інформаційною насиченістю, що органічно єднає його із процесами вимірювання та контролю (ВТК) [3, 4].

Широке застосування мобільних автономних систем – дронів – для вирішення транспортних, а також бойових завдань гостро поставило проблему орієнтації подібних механізмів у просторі, що заповнено перешкодами, особливо в умовах групового застосування в складі рою. Вирішення подібних проблем пов’язане з необхідністю розробки систем орієнтації, що органічно поєднує завдання ВТК оточення мобільного механізму із забезпеченням прихованості дії, захисту від завад та групового застосування. Комплексне вирішення подібних завдань можливе через застосування НДС у різних режимах роботи [5–7].

Метою статті є розробка та дослідження побудови системи ближньої орієнтації мобільних рухомих автоматів на основі застосування сигналів детермінованого хаосу.

Аналіз останніх джерел

Правильним підбором оператора еволюції (типу НДС) та керуючих параметрів можливо генерувати різні типи вимірювальних сигналів від близьких до синусоїдальних аж до близьких до білого шуму, що відкриває можливості оперативного керування процесом вимірювання для отримання більш коректних результатів в умовах протиріч між оптимальним сигналом та вимірювальним параметром [3].

На основі аналізу стану використання СДХ [1–8] запропонована класифікація факторів та наслідків їх застосування в системах ВТК (рис. 1). Найбільш доцільно використовувати СДХ з точки зору контролю, що пов’язано з наявністю різких порогових процесів в НДС [1, 2, 4]. Наявність порогових ефектів, таких як

поява «вікон прозорості» у біфуркаційних діаграмах, різка зміна форми «атрактора», висока чутливість до початкових значень, пороговий характер появи синхронізації між хаотичними генераторами, різкий перехід від одного різновиду синхронізації до іншого обумовлює можливості використання хаотичної обробки в процесах контролю параметрів фізичних величин [5].

Рис. 1. Наслідки використання сигналів детермінованого хаосу під час вимірювання та контролю

Найбільш важливою особливістю СДХ, пов'язаного із його природою, є висока чутливість до зміни початкових параметрів, що лежить в глибинній природі появи хаотичного режиму, яку часто називають «ефектом метелика» [1, 3]. Якщо функціонально поєднати вимірювальну величину та початкові параметри ГХС, то невелика їх зміна призводить до суттєвих змін у вихідному СДХ, крім того, ці зміни експоненційно збільшуються у часі [2]. За таких умов легко отримати надвисоку чутливість вимірювального приладу [4] зі збільшенням часу обробки. На даний час це є одним із найбільш практично реалізованих переваг використання хаотичної обробки під час ВТК [3–6].

Особливе місце під час вимірювань та контролю займає визначення параметрів та характеристик хаотичних процесів, таких як факт появи різних ступенів «хаотичності» у НДС, ідентифікація атракторів, оцінка показників Ляпунова, ідентифікація типу синхронізації, вимірювання широкосмуговості та кореляційних властивостей тощо [4]. В цьому сенсі розумно використовувати не класичні алгоритми, а підходи, що ґрунтуються на застосуванні тих самих СДХ та нелінійних процесів. Подібні завдання викликають потребу активного розвитку окремого підрозділу метрології – «хаотичні вимірювання», для яких запропоновано класифікацію можливих вимірювальних параметрів та характеристик (рис. 2).

Рис. 2. Вимірювальні параметри під час використання вимірювань на основі сигналів детермінованого хаосу

Найбільш придатними для використання в системах вимірювання відстані в реальному часі серед зазначених на рис. 2 є група спектральних та синхронізаційних параметрів та характеристик, що підтверджується спробами їх використання, описаними у [2, 5, 6], які реалізують більшу частину переваг СДХ.

Виклад основного матеріалу

Принцип дії найбільш простого методу ВТК рівня наближення до перешкоди полягає у органічних властивостях ГХС щодо розбігання траєкторій фазових змінних (ФЗ) у часі: два практично однакові ГХС із часом будуть формувати СДХ різних форм зі слабкою кореляцією між ними. Вимірювання рівня відмінності траєкторій реалізується через визначення автокореляційних функцій (АКФ) між одною або декількома ФЗ одночасно [6]. Очевидно, що для орієнтації мобільних автономних механізмів на пласких поверхнях необхідно застосувати мінімум 3 сенсора наближення (рис. 3а) за різними напрямками.

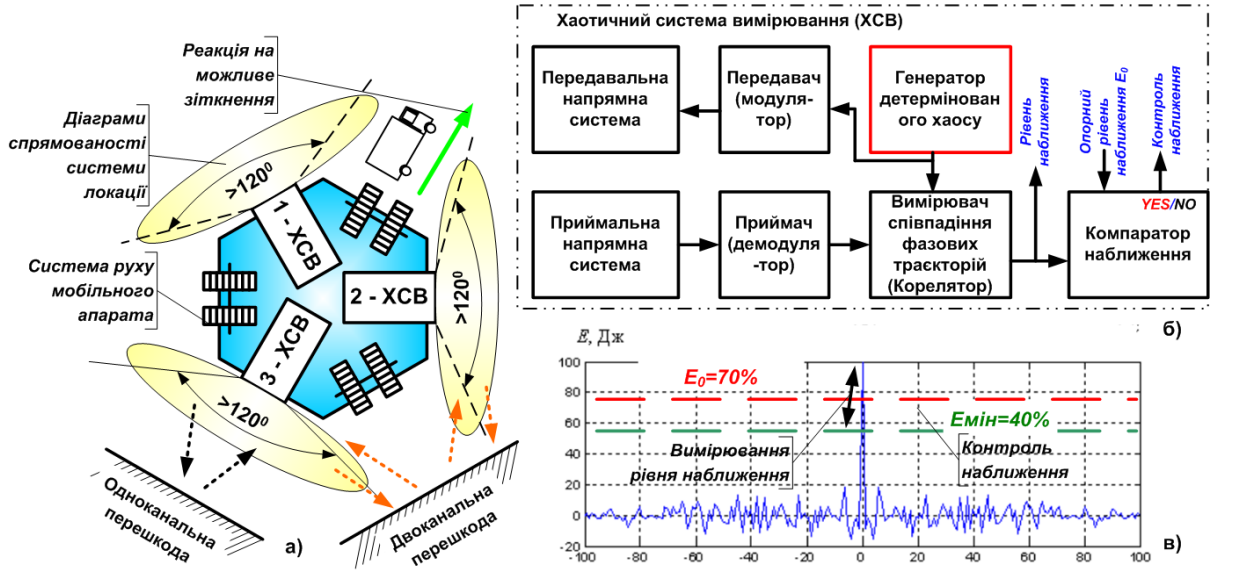


Рис. 3. Схема а), структура каналу б) та АКФ в) сигналу детермінованого хаосу для системи контролю наближення із «розбіганням» фазових траєкторій

Кожний напрямок контролю обробляється СДХ від окремого ГХС через систему випромінювачів, що охоплюють повне коло напрямків (рис. 3а). В найбільш простому випадку ВТК (рис. 3б) здійснюється на основі порівняння зондуючого та відбитого СДХ. У практично однакових ГХС слід обрати ФЗ, найбільш оптимальну із точки зору радіолокаційної АКФ та ВКФ (рис. 3в). Фізична природа каналу (ультразвукова, інфрачервона, тощо) зондування залежить від обраного типу та налаштувань ГХС. Діаграма спрямованості напрямної системи каналу (рис. 3а) для повного кола напрямків обрана дещо більшою 120^0. В такому випадку відбиті від двоканальної перешкоди (рис. 3а) СДХ можуть потрапляти в суміжні вимірювальні канали, що створює системну заваду, яка не перевищує, відповідно проведеним дослідженням, 20% максимуму АКФ. ГХС для такої схеми (рис. 3б) можуть бути різних типів та розмірностей НДС, головне, щоб НДС знаходилась в хаотичному режимі (табл. 1).

Перевагами запропонованої схеми контролю наближення на основі розбігання фазових траєкторій (рис. 3) є простота та типізація (інтеграція) структурних блоків схеми ВТК, а також слабкі вимоги до стабільності хаотичних режимів та можливість використання ГХС в інтегральному виконанні. Недоліками схеми (рис. 3) є необхідність використання 3-х незалежних ГХС, великий час початкового запуску, що необхідний для «розбігання» траєкторій та достатньо велике відношення сигнал/завада в каналі, не менш як 15…20 дБ.

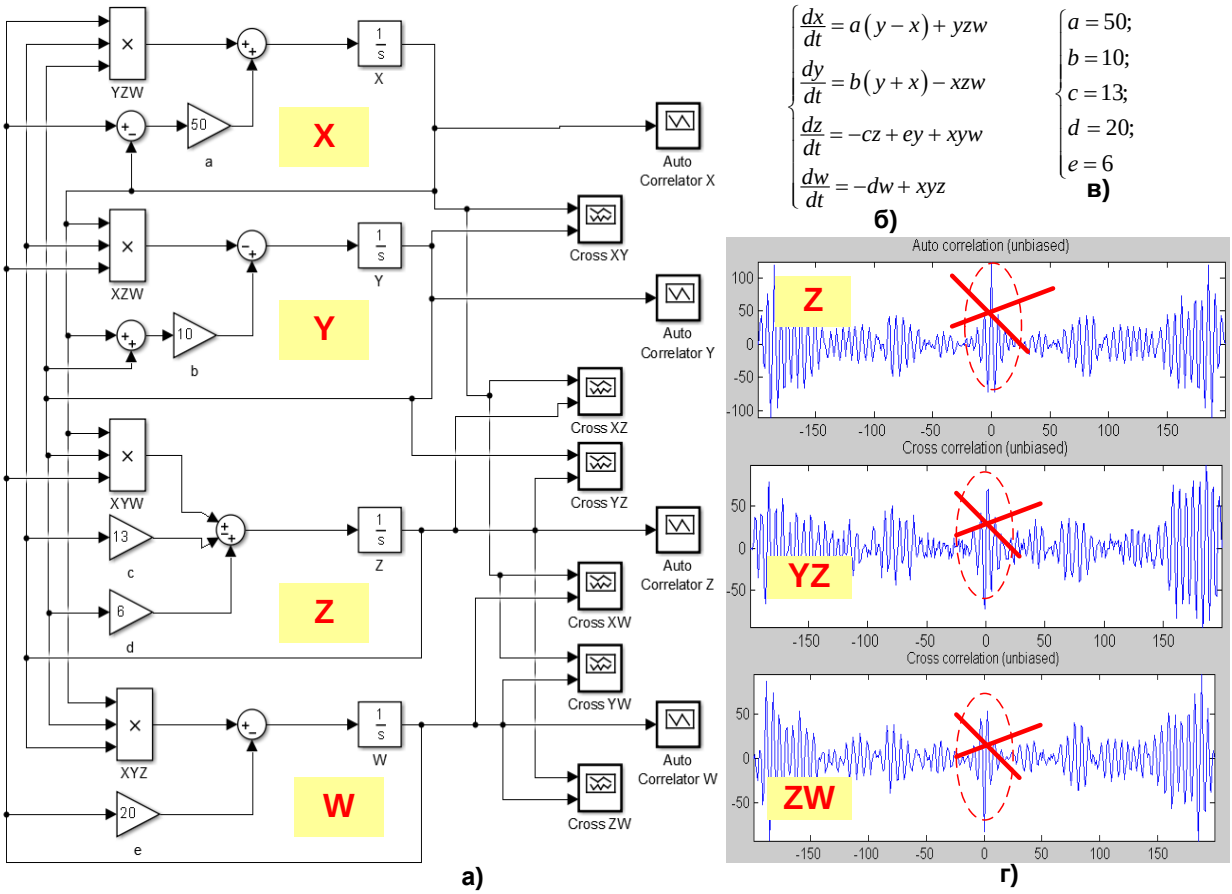
Таблиця 1

Якісний аналіз 3D ГДХ із квадратичною нелінійністю як елементів системи ближньої навігації

№	Назва за прізвищем автора	Кількість параметрів керування	Характеристика АКФ для фазових змінних	Характеристика попарної ВКФ фазових змінних
1	Rucklidge	2	Неоптимальність змінної Z	Неоптимальність між сигналами Y та X
2	Sprott-Linz C	0	-	Неоптимальність між сигналами Y та X
3	Sprott-Linz H	1	-	Неоптимальність ВКФ між усіма фазовими змінними
4	Qi-Chen	3	Неоптимальність змінної Z	Неоптимальність між сигналами Y та X

Частину недоліків схеми рис. 3 можливо усунути через використання різних ФЗ одного ГХС із не менше як трьома незалежними фазовими змінними X, Y, Z (3D хаотичний осцилятор). На даний час відомо декілька сот моделей таких генераторів різної структури та характеру нелінійності [7]. Серед них для застосування у сенсорах наближення слід обрати такі, що відповідають найбільш оптимальній формі АКФ: найбільше перевищення головного максимуму над вторинними максимумами в зоні високої кореляції [6]. Крім того з точки зору практичного застосування в системах ВТК, модель ГХС має мати більш просту практичну реалізацію із можливістю інтеграції в мікросхемах, а також допускати масштабування.

Відповідно [7] для використання у системах ВТК малих відстаней виділено, складено моделі (Simulink) та проаналізовано характер АКФ та ВКФ ряду перспективних 3D ГХС (табл. 1) із квадратичною нелінійністю. Навіть таке просте дослідження показує, що найкращі кореляційні властивості проявляють ФЗ генераторів із більшим ступенем нелінійності в більшій кількості ФЗ моделі, зокрема, у генераторі Qi-Chen. 3D ГХС загалом не відповідають вимогам щодо АКФ та ВКФ для одногенераторної схеми ВТК по всім ФЗ (табл. 1), але крім 3D хаотичних генераторів існують моделі генераторів вищої розмірності, наприклад, 4D генератор за схемою Lorenz із кубічною нелінійністю (рис. 4) [8]. Аналіз моделі 4D ГХС показав, що такий ГХС спроможний забезпечити оптимальні форми АКФ та ВКФ тільки для трьох ФЗ, що вже достатньо для використання в схемі ВТК (рис. 3) із розбіганням фазових траєкторій.



$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(y-x) + yzw \\ \frac{dy}{dt} = b(y+x) - xzw \\ \frac{dz}{dt} = -cz + ey + xyw \\ \frac{dw}{dt} = -dw + xyz \end{cases} \qquad \begin{cases} a = 50; \\ b = 10; \\ c = 13; \\ d = 20; \\ e = 6 \end{cases}$$

Рис. 4. Функціональна схема а), оператор еволюції б), параметри ініціалізації хаосу в) та неоптимальні АКФ та ВКФ 4D хаотичного генератора

Крім використання лише одного ГХС перевагами одногенераторної схеми ВТК у системах ближньої навігації є миттєва готовність до роботи після ввімкнення (різні ФЗ декорельовані без ефекту «метелика»), зменшена чутливість до системних завад, а також можливість роботи за умови більшого рівня зовнішніх шумів (SNR>10 дБ). Недолік одногенераторної схеми – вища структурна складність самого 4D-генератора. Альтернативою системам ВТК із «розбіганням» фазових траєкторій (рис. 3) є запропонована авторами система ближньої навігації (рис. 5) на основі хаотичної синхронізації (ХС). Характер процесу ХС обернений до процесу «розбігання» фазових траєкторій та може бути використаний для ВТК різних фізичних величин через вплив на біфуркаційні параметри ГХС, силу зв'язку та, у меншій мірі, початкові умови.

Структура системи ВТК наближення на основі ХС у мінімальному варіанті складається з 4-х ідентичних за структурою ГХС, один із яких є опорним, а решта веденими, останні відповідають за свій кут огляду можливих перешкод, як і на рис. 3. Якщо мобільний об'єкт наближається до перешкоди, сила зв'язку (або інший параметр впливу) між опорним та деяким із ведених ГХС зростає і ведений генератор починає відтворювати траєкторію опорного по всім ФЗ. За таких умов система ВТК дронів набуває нової позитивної якості, а саме можливості більш точного реагування на двоканальну перешкоду (рис. 3) через часткову ХС двох ведених ГХС за суміжними каналами (див. рис. 3а). Якщо в випадку використання схеми із розбіганням траєкторій (див. рис. 3б) це призводить до збільшення системних завад, то в схемі із ХС (рис. 5а) – до розширення функціональних можливостей реакції системи керування рухом мобільного робота на перешкоду.

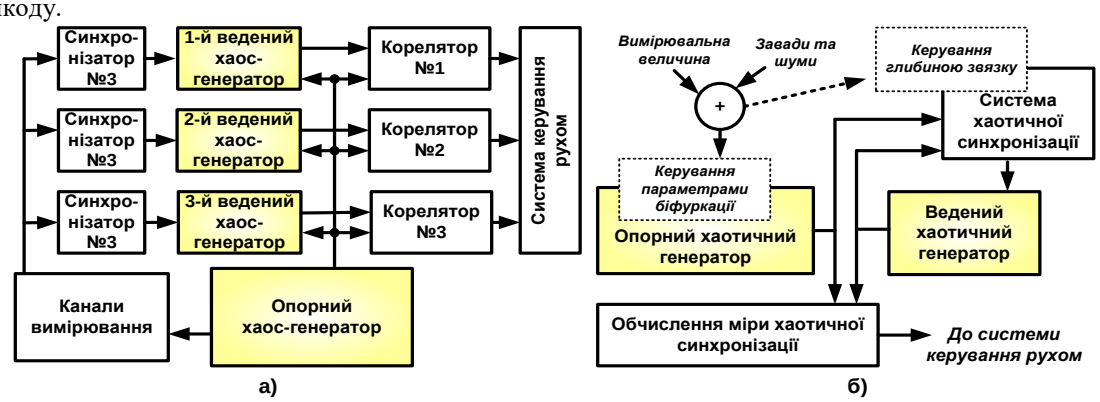


Рис. 5. Структурна схема а) та схема вимірювання б) системи ближньої навігації основі хаотичної синхронізації

Контроль ідентичності СДХ веденого та опорного ГХС може бути реалізовано за розрахунками декількох досить різних мір, у самому простому випадку застосовується метричний коефіцієнт відмінності:

$$\Delta M = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\left(x_{1j}-x_{2j}\right)^2+\left(y_{1j}-y_{2j}\right)^2+\left(z_{1j}-z_{2j}\right)^2\right]}, \quad (1)$$

де x_{1j}, x_{2j} – вибірки порівнювальних сигналів; N – кількість вибірок для забезпечення достатньої точності обчислення міри синхронізації (100…1000) [7]. Залежність метричного коефіцієнту (1) від десинхронізації до повної ХС, пропорційна силі зв'язку або значенню параметра оператора еволюції НДС (рис. 6), саме дозволяє проводити не лише контроль наближення, але і вимірювання рівня наближення. Така залежність характерна не лише для метричного коефіцієнту відмінності, але і для інших мір визначення ідентичності: коефіцієнту кореляції, максимізації взаємного спектру, рівня співпадіння фігур тощо [7].

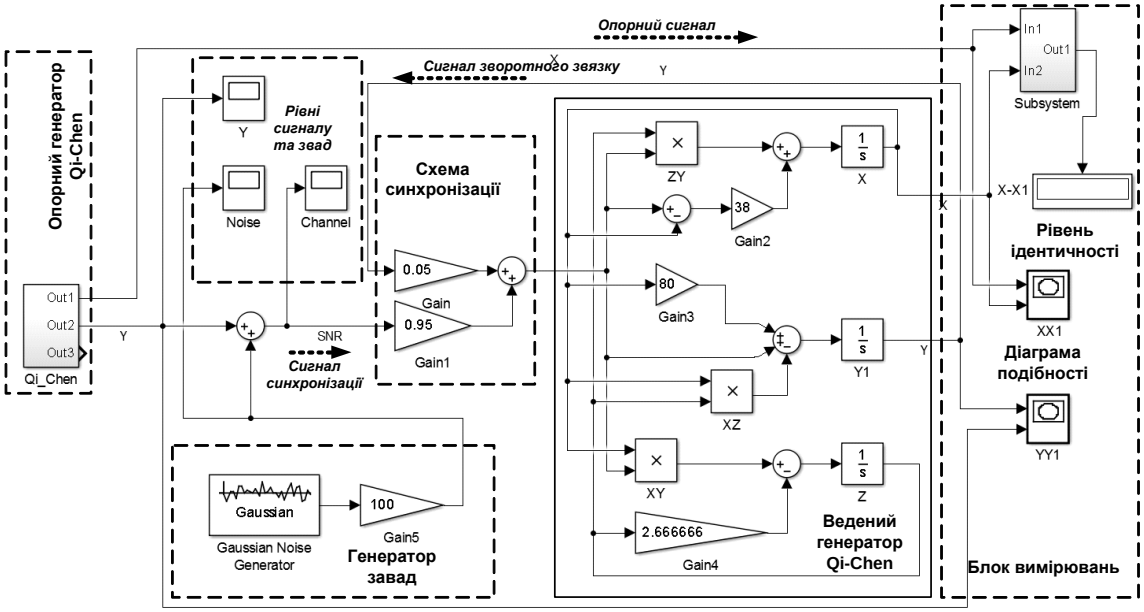


Рис. 6. Модель процесу хаотичної синхронізації між хаотичними генераторами Qi-Chen

Застосування методу ВТК на основі ХС зручне саме для вимірювання малих дальностей також і з позицій характеру виникнення режиму повної ХС лише за умови сильного зв'язку, а сильний зв'язок виникає саме на малих відстанях. Для перевірки працездатності вказаного підходу у середовищі Matlab (Simulink) проведено аналіз роботи процесу ХС для ГХС Qi-Chen в умовах зміни відношення сигнал/шум (SNR), параметрів оператора еволюції та глибини взаємодії опорного та веденого генераторів за моделлю, представленою на рис. 6.

За результатами моделювання (рис. 7) встановлено, що ХС веденого та опорного ГХС за умови ідентичності параметрів біфуркації відбувається навіть на фоні адитивних шумів та завад, що співмірні з рівнем хаотичного синхронізуючого сигналу (рис. 7б). Залежність рівня синхронізації від усіх вимірювальних параметрів можливо розбити на 3 зони: А – зона повної синхронізації, де нормована міра ідентичності приймає значення, близькі до нуля; В – перехідна зона, де реалізується режим часткової синхронізації; С – зона десинхронізації, де фазові траєкторії розходяться та значення міри ХС приймає великі значення.

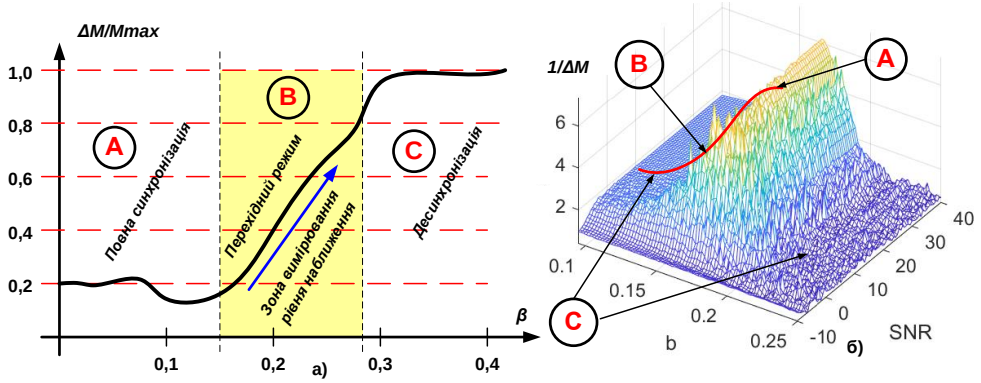


Рис. 7. Залежності рівня ідентичності під час синхронізації генераторів Qi-Chen від сили зв'язку а), біфуркаційного параметра та відношення сигнал/шум б)

Процес вимірювання малих дальностей слід проводити у перехідній зоні В (рис. 7а), де фіксується монотонна залежність (псевдолінійна) значення обраної міри ідентичності СДХ. Перевагами системи ближньої навігації, що ґрунтується на принципі ХС, є: можливість роботи за умов високого рівня шумів; розширення функціональних можливостей через можливість ідентифікації та вимірювання відстаней до двоканальної перешкоди; слабка чутливість до апаратурних та нелінійних спотворень у каналах вимірювання; висока прихованість дії через використання широкосмугових зондуючих СДХ. Серед недоліків слід відзначити збільшену апаратурну складність через використання мінімум 4-х хаотичних генераторів та схеми синхронізації, а також більш складну програмну або апаратну процедуру визначення міри синхронізації.

Робота схеми ВТК (рис. 5а) можлива також у складі рою рухомих автоматів, якщо налаштувати параметри суміжних систем таким чином, щоб взаємна синхронізація не відбувалась. В цьому випадку особливо привабливими є НДС із великою кількістю параметрів (Qi-Chen), маніпуляцією якими можливо встановити зони відсутності взаємної ХС за умови однакового оператора еволюції. Це відкриває можливості для побудови інтегральних схем систем ближньої навігації групи мобільних роботів на базі використання СДХ.

Висновки

1. Розглянуто можливості використання сигналів детермінованого хаосу для вимірювання та контролю фізичних величин, запропоновано класифікаційні схеми особливостей вимірювального процесу та інформаційних вимірювальних параметрів.

2. На основі комп'ютерного моделювання ряду хаос-генераторів показано, що для систем ближньої навігації доцільно використовувати хаотичні генератори не менш як із 4-а фазовими змінними. Запропоновано для побудови системи ближньої навігації мобільних механізмів на площині застосувати властивості односпрямованої хаотичної синхронізації між опорним та веденим генераторами, що забезпечує підвищену прихованість дії, можливість визначення ближніх відстаней, розширення функціональних можливостей та високий рівень завадостійкості.

Література

1. Кузнецов С.П. Динамический хаос / Кузнецов С.П. – М. : Изд-во Физматлит, 2001. – 296 с.

2. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / [Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський] ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.

3. Мачехин Ю. П. Физические основы метрологии нелинейных динамических систем / Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курской // Украинский метрологический журнал. – 2017. – № 1. – С. 8–10.

4. Метод параметричних вимірювань з використанням генератора хаотичних коливань / В.Ю. Кучерук, В.С. Маньковська // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – № 1. – С. 116–120.

5. Fortuna L., Rizzo A., Frasca M., Branciforte M., Bartolone M. System for Detecting Distances Using Chaotic Signals. US Patent № 6738313. 2003. P. 11.

6. Sobhy M. I., Shehata A.R. Chaotic Radar Systems. Microwave Symposium Digest. IEEE MTT-S International. 2000. P. 1701–1704.

7. Голевич О. Б. Впорядкування ансамблів хаотичних сигналів та способи їх використання в надширокосмугових телекомунікаційних / О. Б. Голевич О. С. Пивовар, І. В. Троцишин // Цифрові технології. – Одеса, 2015. – № 17. – С. 181–191.

8. Guoyuan Qi, Shengzhi Du, Guanrong Chen, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan. On a Four-dimensional Chaotic System. Chaos, Solitons and Fractals. 2005. No. 23. P. 1671–1682.

References

1. Kuznecov S.P. Dinamicheskij haos / Kuznecov S.P. – M. : Izd-vo Fizmatlit, 2001. – 296 s.

2. Prykladne zastosuvannia teorii khaotychnykh system u telekomunikatsiiakh : monohrafiia / [Iu. Ya. Bobalo, S. D. Haliuk, M. M. Klymash, R. L. Politanskyi] ; Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika". – Lviv; Drohobych : Kolo, 2015. – 184 s.

3. Machehin Yu. P. Fizicheskie osnovy metrologii nelinejnyh dinamicheskih sistem / Yu. P. Machehin, Yu. S. Kurskoj // Ukrainskij metrologicheskij zhurnal. – 2017. – № 1. – S. 8–10.

4. Metod parametrychnykh vymiriuvan z vykorystanniam heneratora khaotychnykh kolyvan / V.Iu. Kucheruk, V.S. Mankovska // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2009. – № 1. – S. 116–120.

5. Fortuna L., Rizzo A., Frasca M., Branciforte M., Bartolone M. System for Detecting Distances Using Chaotic Signals. US Patent № 6738313. 2003. P. 11.

6. Sobhy M. I., Shehata A.R. Chaotic Radar Systems. Microwave Symposium Digest. IEEE MTT-S International. 2000. P. 1701–1704.

7. Holevych O. B. Vporiadkuvannia ansambliv khaotychnykh syhnaliv ta sposoby yikh vykorystannia v nadshyrokosmuhovykh telekomunikatsiinykh / O. B. Holevych O. S. Pyvovar, I. V. Trotsyshyn // Tsyfrovi tekhnolohii. – Odesa, 2015. – № 17. – S. 181–191.

8. Guoyuan Qi, Shengzhi Du, Guanrong Chen, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan. On a Four-dimensional Chaotic System. Chaos, Solitons and Fractals. 2005. No. 23. P. 1671–1682.

Рецензія/Peer review : 13.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-155-160
УДК 621.382.2

А.С. КАШТАЛЬЯН, О.В. КАШТАЛЬЯН
Хмельницький національний університет

ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ РОЗШИРЕНОЮ ЗГОРТКОВОЮ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ

В статті запропоновано метод прогнозування часових рядів адаптованою розширеною згортковою нейронною мережею за архітектурою, подібною до WaveNet. Використання розширених каузальних згорткових шарів дозволяє збільшити рецептивне поле та врахувати довгострокові залежності в часових рядах. Нейромережева модель є повністю ймовірнісною та авторегресивною, генерує наступне значення часового ряду на основі попередніх, а також на основі додаткової інформації. В нейромережевій архітектурі використовується моделювання спільного розподілу точок як добутку умовних розподілів. Такого типу архітектури здатні моделювати розподіли великої кількості випадкових величин, в тому числі часові ряди. Основною складовою згорткової мережі для прогнозування часових рядів є каузальна згортка. Порядок обчислення згортки передбачає залежність поточного значення часового ряду тільки від попередніх значень, що для 1-D згортки забезпечується зсувом виходу звичайної згортки на відповідну кількість тактів вперед. Таким чином виходи для всіх тактів в процесі навчання розраховуються паралельно. Процес генерації значень часового ряду є послідовним, для кожного такту прогнозується наступне значення, яке використовується для подальшого прогнозування. Для збільшення величини рецептивного поля використовується розширена згортка. Розширена згортка представляє собою згортку, в якій фільтр застосовується до площі, більшої за величину фільтра за рахунок пропуску частини вхідних значень з визначеним кроком. В запропонованій мережі рецептивне поле експоненційно зростає зі збільшенням кількості шарів. Оцінка точності розглянутої нейромережевої моделі проводилася в застосуванні до нелінійних часових рядів, а саме до цін на акції. Були проаналізовані дані трьох компаній, отримані з відкритих джерел, з яких були сформовані навчальна та тестова вибірки. В якості метрик було використано середньоквадратичну похибку та середню абсолютну похибку у відсотках. Розширена каузальна згорткова модель показує кращі точнісні результати і в порівнянні з авторегресивною моделлю, і з рекурентною LSTM моделлю. Нейромережева модель зі згортковими шарами не має рекурентних зв'язків, тому забезпечує вищу швидкість навчання у порівнянні з рекурентними моделями.

Ключові слова: часовий ряд, розширена каузальна згортка, розподіл ймовірностей.

A. KASHTALIAN, O. KASHTALIAN
Khmelnytskyi National University

TIME SERIES PREDICTION WITH DILATED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

The method of time series forecasting with the adapted dilated causal convolutional neural network model is proposed in the article. The model architecture is similar to WaveNet. The use of dilated causal convolutional layers allows to increase receptive field and to consider long-term dependencies in time series. The neural network model is full probabilistic and autoregressive, it generates the next time series value on the basis of previous ones and also on the basis of additional information. The modelling join distribution of points as a multiplication of conditional distributions is used. The such types of architectures is able to model distributions of a big number of random values, including time series. The main part of convolutional neural network for time series forecasting is causal convolution. The order of computation supposes the dependence of current value only from previous values. It provides by shifting output of usual convolution on certain number of time steps forward for 1-D convolution. Thus outputs for all time steps are computed in parallel in training process. The generation process is sequential, the next value is predicted for every time step, and this value is used for further prediction. A dilated convolution is used for increasing receptive field. Dilated convolution is convolution with a filter applied to area bigger than filter size for the account of skipping a part of input values with certain step. A receptive field increases exponentially with increasing layers number in considered network. The estimation of considered neural network model was carried out due to nonlinear time series, in particular to stock prices. The data of three companies was analysed. The data were obtained from open sources and create training and testing samples. Root mean squared error and mean absolute percentage error were used as metrics. The dilated causal convolutional model shows a better accuracy results in comparison both with autoregressive model and recurrent LSTM model. The neural network with convolutional layers does not have recurrent connections, so it provides higher training speed relatively to recurrent models.

Key words: time series, dilated causal convolution, probability distribution.

Вступ. Задача прогнозування часових рядів, в тому числі фінансових, була та є актуальною, оскільки така попередня оцінка є необхідним елементом багатьох видів діяльності, особливо це стосується будь-якої інвестиційної діяльності. Розв'язання цієї задачі є нелегким, оскільки фінансові часові ряди, зокрема такі як ціни на акції, можуть бути нестаціонарними та нелінійними. Методи аналізу та прогнозування часових рядів можна розділити на чотири категорії: статистичні, розпізнавання образів, машинного навчання та сентиментного аналізу. Ці методи здебільшого відносяться до технічного аналізу з використанням фундаментального аналізу [1].

Статистичні методи аналізу часто передбачають, що часовий ряд відповідає вимогам лінійності та стаціонарності ряду, та використовують дані часового ряду в якості вхідних величин. Одна група статистичних методів включає авторегресивне рухоме середнє (ARMA), авторегресивне інтегроване рухоме середнє (ARIMA), узагальнену авторегресивну умовну гетероскедастичну (GARCH) волатильність, авторегресійну модель з плавним переходом. Інша група статистичних методів включає лінійний дискримінантний аналіз, квадратичний дискримінантний аналіз, регресійні алгоритми.

Розпізнавання образів в загальному є схожим до машинного навчання, однак в аналізі фінансових часових рядів використовується дещо іншим чином. Розпізнавання образів зосереджене на виявленні зразків

та трендів в даних ряду. Технічний аналіз ґрунтується на зразках, виявлених безпосередньо в даних акцій, це включає візуальний аналіз діаграм цін, об'ємів або інших приведених показників. Двома широко використовуваними методи розпізнавання образів в даній області є метод перцепційно важливих точок та порівняння зразків.

Серед методів машинного навчання для прогнозування часових рядів використовуються як більш прості підходи, такі як дерева рішень, дискримінантний аналіз, байєсівський метод. Так само використовуються сучасні більш вдосконалені методи – випадковий ліс, логістична регресія та нейронні мережі. Враховуючи нелінійності в часових рядах використання нейронних мереж стає сучасним трендом в прогнозуванні.

Семантичний аналіз є однією з сучасних складових прогнозування фінансових часових рядів, який дозволяє використати якісну інформацію для розрахунку числових значень. В процесі прогнозування використовується автоматичний аналіз текстової інформації, такої як стрічки новин та публічних повідомлень щодо діяльності компаній. Поширеним підходом до прогнозування часових рядів є поєднання декількох методів з вище згаданих груп.

Аналіз досліджень та публікацій. Оскільки часові ряди в багатьох областях є нестаціонарними та мають нелінійність, нейронні мережі стають все більш вживаними для прогнозування часових рядів порівняно з іншими підходами. Цьому також сприяє швидкий розвиток науковцями різноманітних архітектур нейронних мереж. Основними архітектурами, адаптованими для прогнозування, є повнозв'язні мережі прямого розповсюдження, рекурентні та згорткові мережі.

Повнозв'язними нейронними мережами прямого розповсюдження є нелінійна авторегресійна мережа (NAR) та нелінійна авторегресійна мережа з зовнішнім входом/входами (NARX) [2, 3]. NAR використовує повнозв'язні шари для прогнозування майбутніх значень на основі попередніх. NARX відрізняється тим, що на входи, крім значень безпосередньо часового ряду, подається також додаткова інформація.

Рекурентні нейронні мережі внаслідок своєї будови органічно підходять для моделювання послідовностей, в тому числі часових рядів. Також рекурентні нейронні мережі мають властивість пам'яті на відміну від мереж прямого розповсюдження. Для прогнозування використовують класичні рекурентні архітектури, такі як мережі Елмана та Джордана [4]. Останні декілька років були розроблені архітектури рекурентних нейронних мереж, які у порівнянні з класичними мають властивості «довгої» та «короткої» пам'яті, зокрема це Long-Short Term Memory (LSTM) та Gated Recurrent Unit (GRU), що дозволяє враховувати при прогнозуванні більш довгострокові залежності [5].

Згорткові нейронні мережі набули свого розвитку здебільшого в обробці зображень. Однак з розробкою каузальних згорткових шарів, розширених згорткових шарів та їх поєднання доцільно такі рішення застосовувати в області аналізу та прогнозування часових рядів [6]. Подальший матеріал більш розгорнуто пояснює використання розширеної каузальної згорткової мережі для цієї задачі.

Архітектура нейронної мережі для прогнозування часових рядів. Розширена згорткова нейронна мережа типу WaveNet [7] застосовується для аналізу, обробки та генерації аудіо сигналів. В нейромережевій архітектурі використовується моделювання спільного розподілу пікселів або слів як добутку умовних розподілів. Такого типу архітектури здатні моделювати розподіли понад тисячі випадкових величин [8], в тому числі зображення, аудіо сигнали, часові ряди.

Спільна ймовірність часового ряду $\mathbf{x} = \{x_1, \ldots, x_T\}$ розкладається на множники як добуток умовних ймовірностей таким чином

$$p(\mathbf{x}) = \prod_{t=1}^{T} p\left(x_t \middle| x_1, \ldots, x_{t-1}\right).$$

Кожна точка x_t залежить від точок усіх попередніх тактів.

Генерація майбутніх точок часового ряду проводиться подібно до нейромережевої архітектури PixelCNN [9]. В PixelCNN порядок залежностей пікселів визначається як при растровому скануванні, генерується рядок за рядком, точка за точкою в кожному рядку.

Основною складовою згорткової мережі для прогнозування часових рядів є каузальна (причинна) згортка. На рис. 1 зображено стек каузальних згорткових шарів. Такий порядок розрахунку забезпечує коректне моделювання даних – для визначення розподілу поточного значення $p\left(x_{t+1} \middle| x_1, \ldots, x_t\right)$ використовуються тільки попередні значення часового ряду і не враховуються наступні $x_{t+1}, x_{t+2}, \ldots, x_T$. Для 1-D згортки такий порядок забезпечується зсувом виходу звичайної згортки на відповідну кількість тактів вперед.

В процесі навчання мережі згорткові виходи для всіх тактів можуть розраховуватися паралельно, оскільки всі такти **x** відомі. Процес генерації майбутніх значень є послідовним: для кожного такту прогнозується майбутнє значення, потім воно використовується для прогнозування наступного значення, і цей процес циклічно повторюється.

Нейромережева модель з каузальними згортковими шарами не має рекурентних зв'язків, що зазвичай забезпечує вищу швидкість навчання в порівнянні з рекурентними нейронними мережами, особливо у випадку довгих послідовностей. Однією з проблем використання каузальних згорткових шарів є

необхідність використання великої кількості шарів або фільтрів з значним рецептивним полем. Наприклад, на рис. 1 рецептивне поле дорівнює 5. Тому для збільшення величини рецептивного поля використовується розширена згортка, яка дозволяє збільшити рецептивне поле без значних втрат інформації та часу обчислень.

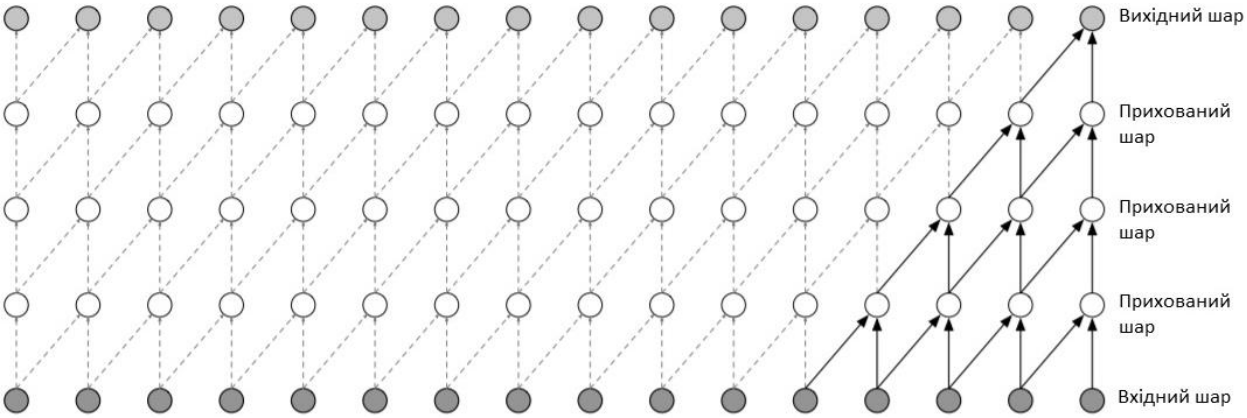


Рис. 1. Стек каузальних згорткових шарів

Розширена згортка представляє собою згортку, в якій фільтр застосовується до площі, більшої за величину фільтра за рахунок пропуску частини вхідних значень з визначеним кроком. Це еквівалентно згортці з фільтром більшої величини, отриманим зі звичайного фільтра розширенням його нульовими значеннями. Такий підхід дає ефект, схожий на використання пулінг шару або згортки з кроком, більшим за одиницю, але при цьому вихід згорткового шару має той же розмір, що і вхід. Згортка з розширенням 1 перетворюється до звичайної згортки. На рис. 2 зображено архітектуру нейронної мережі з розширеними каузальними шарами з розширеннями 1, 2, 4, 8. Стек розширених згорткових шарів дозволяє отримати достатньо велике рецептивне поле порівняно невеликою кількістю шарів, при цьому час обчислення не збільшується. В нейронній мережі WaveNet використовується стек згорткових шарів з розширеннями 1, 2, 4, …, 512, 1, 2, 4, …, 512, 1, 2, 4, …, 512. Таким чином рецептивне поле експоненційно зростає зі збільшенням кількості шарів.

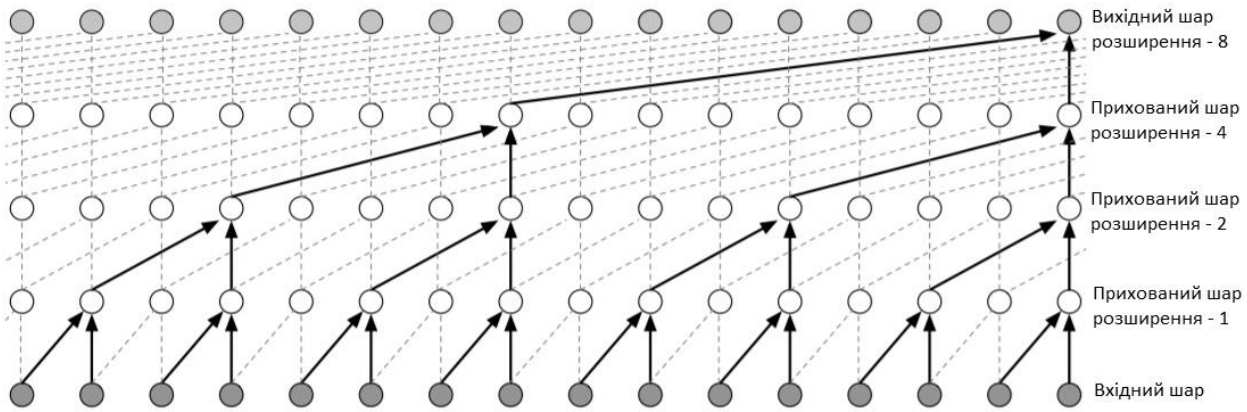


Рис. 2. Стек розширених каузальних згорткових шарів

Модифікована нейронна мережа на основі WaveNet складається з умовної мережі $c = C(\upsilon)$, яка перетворює низькочастотні ознаки υ до вищих частот, та авторегресивного процесу $P(y_i \,|c, y_{i-1}, \ldots, y_{i-R})$, який прогнозує наступну точку процесу на основі наявних умов поточного такту та попередніх R тактів [10]. R – це розмір рецептивного поля і є параметром, який визначається архітектурою нейронної мережі. Структурна схема нейронної мережі для генерування значень часового ряду наведена на рис. 3.

Структура авторегресивної мережі параметризована числом шарів ℓ, кількістю пропущених каналів s та кількістю залишкових каналів r.

Для зменшення кількості ймовірностей часовий ряд квантується до a = 256 з використанням компресії за μ-законом

$$f(x_t) = sign(x_t)\frac{\ln(1+\mu|x_t|)}{\ln(1+\mu)},$$

де $-1 < x_t < 1$ та μ=255. Таке нелінійне квантування дає помітно кращі результати ніж звичайне лінійне квантування.

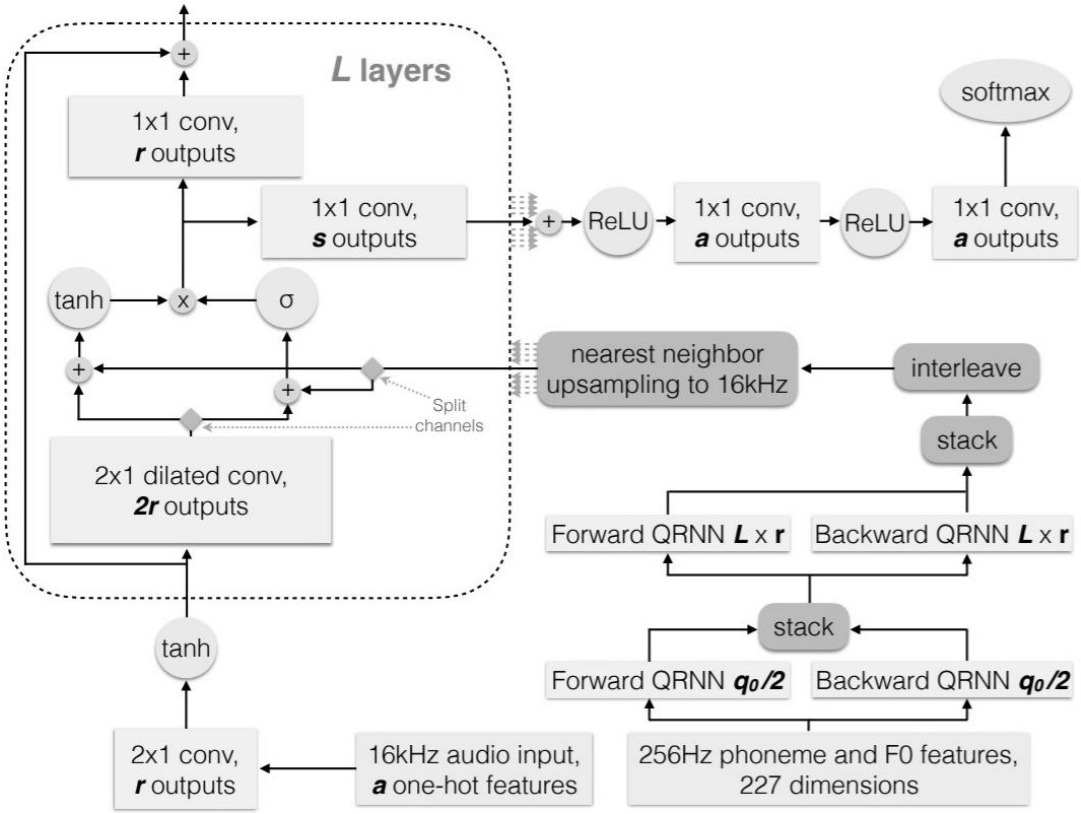


Рис. 3. Структурна схема нейронної мережі WaveNet для генерування значень часового ряду

Кодовані значення проходять через шар згортки 2x1, який генерує входи $x^{(0)} \in \mathbf{R}^r$ для першого шару стеку залишкових шарів:

$$x^{(0)} = W_{embed} * y + B_{embed},$$

де * позначає оператор однорозмірної згортки. Кожний шар послідовності обчислює вектор внутрішніх станів $h^{(i)}$ і потім, відповідно до залишкових зв'язків між шарами, додає до входу $x^{(i-1)}$ для генерації виходів $x^{(i)}$:

$$h^{(i)} = \tanh\left(W_h^{(i)} * x^{(i-1)} + B_h^{(i)} + L_h^{(i)}\right) \cdot \sigma\left(W_g^{(i)} * x^{(i-1)} + B_g^{(i)} + L_g^{(i)}\right),$$
$$x^{(i)} = x^{(i-1)} + W_r^{(i)} \cdot h^{(i)} + B_r^{(i)}, \qquad 1)$$

де $L^{(i)}$ – вихід шару умовної мережі. Оскільки кожний шар додає власні виходи до входів, розмірність шарів повинна залишатися рівною числу залишкових каналів *r*. Цього вдається досягнути згорткою з *r* вхідними та 2*r* вихідними каналами. В процесі генерації ця згортка заміщується двома добутками матриця-вектор з матрицями W_{prev} та W_{cur}. Таким чином розрахунок $h^{(i)}$ для окремого такту (1) перетворюється до вигляду:

$$h'^{(i)} = W_{prev}^{(i)} \cdot x_{t-d}^{(i-1)} +_{cur}^{(i)} \cdot x_t^{(i-1)} + B^{(i)} + L^{(i)},$$
$$h^{(i)} = \tanh\left(h'^{(i)}_{0:r}\right) \cdot \sigma\left(h'^{(i)}_{r:2r}\right),$$

де $L^{(i)}$ – конкатенація $L_h^{(i)}$ та $L_g^{(i)}$, $B^{(i)}$ – конкатенація $B_h^{(i)}$ та $B_g^{(i)}$.

Прихований стан $h^{(i)}$ кожного шару з 1-го по ℓ-й об'єднується з W_{skip} до кількості пропущених каналів *s*:

$$h = \begin{bmatrix} h^{(1)} \\ h^{(2)} \\ \vdots \\ h^{(\ell)} \end{bmatrix}, \quad h \in \Re^{\ell r},$$

$$z_s = relu\left(W_{skip} \cdot h + B_{skip}\right), \quad z_s \in \Re^s,$$

де $relu(x) = \max(0, x)$.

Потім z_s подається на два повнозв'язаних шари для генерації вихідного розподілу $p \in \Re^a$:

$$z_a = relu\left(W_{relu} \cdot z_s + B_{relu}\right), \quad z_a \in \Re^a,$$
$$p = soft\max\left(W_{out} \cdot z_a + B_{out}\right).$$

Модель, навчена без умовної інформації, прогнозує майбутні значення часового ряду тільки на основі попередніх значень. Для підвищення точності прогнозування кожне значення прогнозується не тільки на основі попередніх значень, а також на основі додаткової умовної інформації. Додаткова умовна інформація зміщує кожний шар вектором, генерованим з додаткових вхідних сигналів. Якщо додаткова інформація змінюється з меншою частотою, ніж безпосередньо значення часового ряду, то використовується процедура підвищувальної дискретизації шляхом повторення або розгортки. В даній архітектурі додаткові вхідні сигнали проходять через два двонаправлених квазі-RNN (QRNN) шари з пулінгом та 2x1 згорткою. Однонаправлений QRNN шар визначається такими рівняннями:

$$\tilde{h} = \tanh(W_h * x + B_h),$$
$$o = \sigma(W_o * x + B_o),$$
$$f = \sigma(W_f * x + B_f),$$
$$h_t = f_t \cdot h_{t-1} + (1 - f_t) \cdot \tilde{h}_t,$$
$$z_t = o_t \cdot h_t.$$

Результат двонаправленого QRNN шару отримується шляхом об'єднання результатів двох однонаправлених QRNN шарів, одного для вхідної послідовності та одного для реверсивної копії вхідної послідовності. Після двонаправленого QRNN шару додаткові сигнали нижчої частоти повторюються або розгортаються.

На кожному такті модель генерує розподіл точок $P(s)$, визначений попередніми значеннями часового ряду та додатковими умовними сигналами. Є декілька варіантів використання генерованого розподілу:

а) пряма вибірка – випадкова вибірка з $P(y)$;

б) температурна вибірка – випадкова вибірка з розподілу відповідно до температури *t*: $\tilde{P}_t(y) = \frac{1}{Z} P(y)^{1/t}$, де *Z* – нормалізована константа;

в) вибірка середнього значення розподілу: $E_p[y]$;

г) вибірка найбільш ймовірної точки: $\arg\max P(y)$;

д) вибірка з корегованого розподілу, що дозволяє тільки *k* верхніх точок: $\tilde{P}_k(y) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } y < k_{th}(P(y)) \\ P(y)/Z & \text{інакше} \end{cases}$, де *Z* – нормалізована константа.

В режимі прогнозування значень часового ряду нелінійні функції апроксимуються з високою точністю відповідними співвідношеннями. Враховуючи, що $\tilde{e}(x)$ є апроксимацією $e^{|x|}$, для функції гіперболічного тангенсу та сигмоїдальної функції використовуються такі вирази:

$$\tanh(x) \approx sign(x) \frac{\tilde{e}(x) - 1/\tilde{e}(x)}{\tilde{e}(x) + 1/\tilde{e}(x)},$$

$$\sigma(x) = \begin{cases} \frac{\tilde{e}(x)}{1 + \tilde{e}(x)}, & x \geq 0, \\ \frac{1}{1 + \tilde{e}(x)}, & x < 0. \end{cases}$$

Для представлення $\tilde{e}(x)$ обрано поліном четвертого ступеня.

Для апроксимації e^x використано апроксимацію 2^x і співвідношення $e^x = 2^{x/\ln 2}$:

$$2^x = 2^{[x]} \cdot 2^{x-[x]} = 2^{[x]} \cdot \left(1 + \left(2^{x-[x]} - 1\right)\right),$$

де $0 \leq 2^{x-[x]} - 1 < 1$, оскільки $0 \leq x - [x] < 1$.

Розмірність вихідних значень дорівнює розмірності вхідних за рахунок відсутності pooling шарів. Виходом моделі є категорійний розподіл величини x_t з softmax шару.

Результати експерименту. Оцінка розглянутої нейромережевої архітектури типу WaveNet проводилася в застосуванні до нелінійних часових рядів, якими зокрема є фінансові часові ряди, а саме ціни на акції. Всі дані бралися з відкритих джерел, ресурсу Yahoo Finance (https://finance.yahoo.com). Були проаналізовані дані трьох компаній: Xilinx Inc. (XLNX), Walmart Inc. (WMT) та Apple Inc. (AAPL), – в комбінації з об'ємами продажів акцій та додатковими даними індексів: S&P 500, Russel 2000, Dow 30, Nasdaq, VIX.

Навчальна вибірка була сформована з даних за п'ять років (з 2014 р. до 2018 р. включно) для врахування довгострокових трендів у змінах на ціни акцій. В якості значення ціни на акції бралася зважена ціна закриття. Тестова вибірка включила дані за перші шість місяців поточного року (січень – червень 2019 р.), на яких проводилося прогнозування на один день вперед. Дані навчальної та тестової вибірок були нормалізовані за співвідношенням

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma},$$

де x – вихідні дані, μ – середнє значення, σ – середньоквадратичне відхилення.

В якості метрик для тестів було використано середньоквадратичну похибку (root mean squared error –RMSE) та середню абсолютну похибку у % (maximum absolute percentage error – MAPE).

Для порівняння взято результати прогнозування часових рядів існуючими моделями: відомою в економетриці авторегресивною моделлю (AR) та рекурентною моделлю на основі LSTM [11]. Результати прогнозування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати прогнозування

	Авторегресивна модель (AR)		Рекурентна модель (LSTM)		Згорткова модель (ConvNet)	
	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
XLNX	0,34	2,05	0,11	1,54	0,08	1,23
WMT	0,32	1,55	0,10	0,91	0,07	0,75
AAPL	0,19	1,64	0,07	1,19	0,05	0,88

Таким чином, розширена каузальна згорткова мережа показує вищі точнісні результати у порівнянні з розглянутими моделями.

Висновки і перспективи подальших досліджень. В статті проаналізовано застосування розширеної каузальної згорткової нейронної мережі типу WaveNet для прогнозування часових рядів. Завдяки використанню розширеної згортки збільшено рецептивне поле, що дає можливість враховувати більш довгострокові залежності в часових рядах. Також мережа має додаткові входи, які отримують інформацію з додаткових даних, від яких залежить часовий ряд. Прогнозування часових рядів, особливо нелінійних, є складною задачею, для якої розроблено досить велику кількість підходів. Розглянута розширена каузальна згорткова мережа є порівняно простою, ефективною та зрозумілою моделлю, яка показує результати порівняні та кращі відносно відомих моделей, таких як авторегресійна модель та рекурентна нейромережева LSTM модель. Крім того розглянута згорткова мережа показує кращий час навчання порівняно з рекурентними мережами. Архітектура типу WaveNet є досить новою і має ресурси для подальшого її вдосконалення. Одним з таких напрямків є досягнення компромісу між кількістю шарів та фільтрів, що потрібно для моделювання нелінійності, та уникненням перенавчання.

Література

1. Dev Shah, Haruna Isah, Farhana Zulkernine. Stock Market Analysis: A Review and Taxonomy of Prediction Techniques. International Journal of Financial Studies, 2019, 7, 26, P. 1–21.
2. Boussaada Z., Curea O., Remaci A., Camblong H., Bellaaj N.M. A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) Neural Network Model for the Prediction of the Daily Direct Solar Radiation. Energies, 2018, Issue 11, P. 620–641.
3. Kashtalian A. The features of feedforward neural network use for time series forecasting. Herald of Khmelnytskyi National University: Technical Science. Khmelnitsky: KhNU, 2016, Issue 6(243), P. 210–215.
4. Wang J., Wang J., Fang W., Niu H. Financial Time Series Prediction Using Elman Recurrent Random Neural Networks. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, Issue 12, P. 1–14.
5. Petnehazi G. Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting. arXiv:1901.00069v1 [cs.LG] 1 Jan 2019. URL: https://arxiv.org/pdf/1901.00069.pdf. Accessed 10 Sep 2019.
6. Borovykh A., Bohte S., Oosterlee C.W. Conditional time series forecasting with convolutional neural networks. arXiv:1703.04691v5 [stat.ML] 17 Sep 2018. URL: https://arxiv.org/pdf/1703.04691.pdf. Accessed 10 Sep 2019.
7. Van den Oord A., Dieleman S., Zen H., Simonyan K., Vinyals O., Graves A., Kalchbrenner N., Senior A., Kavukcuoglu K. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio. arXiv:1609.03499v2 [cs.SD] 19 Sep 2016. URL: https://arxiv.org/pdf/1609.03499.pdf. Accessed 10 Sep 2019.
8. Aaron van den Oord, Kalchbrenner N., Kavukcuoglu K. Pixel recurrent neural networks. arXiv:1601.06759v3 [cs.CV] 19 Aug 2016. URL: https://arxiv.org/pdf/1601.06759.pdf. Accessed 19 Sep 2019.
9. Van den Oord A., Kalchbrener N., Vinyals O., Espeholt L., Graves A., Kavukcuoglu K. Conditional Image Generation with PixelCNN Decoders. arXiv:1606.05328v2 [cs.CV] 18 Jun 2016. URL: https://arxiv.org/pdf/1606.05328.pdf. Accessed 19 Sep 2019.
10. Arik S. O., Chrzanowski M., Coates A., Diamos G., Gibiansky A., Kang Y., Li X., Miller J., Ng A., Raiman J., Sengupta S., Shoeybi M. Deep Voice: Real-time Neural Text-to-Speech. arXiv:1702.07825v2 [cs.CL] 7 Mar 2017. URL: https://arxiv.org/pdf/1702.07825.pdf. Accessed 19 Sep 2019.
11. Fisher T., Krauss C. Deep Learning with Long Short-Term Memory networks for financial market predictions. FAU Discussion papers in Economics, 2017, Issue 11, P. 961–970.

Рецензія/Peer review : 18.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-161-167
УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Д.С. ПАРТИКА
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ ПЛОСКОЇ ЕКВІДИСТАНТНОЇ РІВНОАМПЛІТУДНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ЗАЛЕЖНО ВІД ДОВЖИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ, КІЛЬКОСТІ ВИПРОМІНЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ВІДСТАНІ МІЖ НИМИ

Наукова стаття присвячена дослідженню параметрів діаграми направленості плоскої еквідестантної рівноамплітудної фазованої антенної решітки (ФАР) залежно від кількості M×N випромінюючих елементів, відстані між ними при заданому куті діаграми направленості ФАР. Проведені розрахунки множника діаграми направленості фазованої антенної решітки в прямокутній, полярній системах координат та в тривимірному просторі. Здійснено аналіз рівня бічних пелюсток відносно головної, а також знайдено ширину головної та бічних пелюсток діаграми направленості фазованої антенної решітки.

Ключові слова: плоска еквідистантна рівноамплітудна фазована антенна решітка, хвильове число вільного простору, діаграма направленості антени, множник антенної решітки, рівень бічних пелюсток діаграми направленості антени, ширина головної та бічних пелюсток діаграми направленості антени.

V.I. LUZHANSKIY, D.A. MAKARISHKIN, D.S. PARTYKA
Khmelnytskyi National University

THE STUDY OF THE RADIATION PATTERN OF A FLAT EQUIDISTANT EQUALS AMPLITUDE PHASED ANTENNA ARRAY, DEPENDING ON THE LENGTH OF THE ELECTROMAGNETIC WAVE, THE NUMBER OF RADIATING ELEMENTS IN THE ANTENNA ARRAY AND THE DISTANCE BETWEEN THEM

The scientific article is devoted to the study of the parameters of the radiation pattern of a plane equidistant equal amplitude phased array antenna. The parameters of which will depend on the length of the electromagnetic wave, on the number of M × N radiating elements, the distance between them at a given angle of the beam antenna array. Formulas for calculating the directivity diagram of the phased array antenna in rectangular, polar coordinate systems and in three-dimensional space are given. The formulas for finding the level of the lateral petals relative to the principal are given, and the width of the principal and lateral petals of the directional diagram of the phased antenna array is determined and analysed. This study is needed to obtain such a phased array antenna in which the radiation pattern of the main beam of the radiation pattern will have the most optimal parameters. The use of such a phased array antenna will significantly improve the efficiency of modern airborne and terrestrial radio systems by performing a fast, inertia-free space survey by forming a radiation pattern with the required width and level of the lateral lobes, by creating an appropriate amplitude-phase distribution over the lattice opening. It will also allow many rays to be formed with a single antenna. The high speed of tipping such rays, will open the possibility of designing multipurpose, multifunctional radar stations.

Keywords: a flat equidistant equal amplitude phased antenna array, wave number of free area, radiation pattern antenna array, multiplier phased array, level of lateral petals of antenna array, width of head and side petals of radiation pattern.

Вступ

Фазованими антенними решітками (ФАР) називаються антенні решітки, в яких напрям максимального випромінювання (прийому) і форма відповідної їй діаграми направленості (ДН) змінюються за допомогою зміни кількості випромінюючих елементів в антенній решітці, відстані між ними та довжини електромагнітної хвилі. Використання ФАР дозволяє істотно підвищити ефективність сучасних бортових і наземних радіосистем за рахунок здійснення швидкого безінерційного огляду простору шляхом сканування променем антенної решітки електричними методами (електричне сканування); збільшення коефіцієнта підсилення антени; формування діаграми направленості з необхідними шириною і рівнем бічних пелюсток, шляхом створення відповідного амплітудно-фазового розподілу по розкриву решітки [4].

Впровадження фазованих антенних решіток в радіолокаційну техніку відкриває такі можливості:

Електричне сканування променю в широкому секторі. Можливість здійснення програмного огляду простору.

Отримання ДН заданої форми, яка може змінюватися в процесі роботи шляхом регулювання амплітуд і фаз збудження випромінювачів.

Можливість формування за допомогою однієї антени багатьох променів. Висока швидкість перекидання променю відкриває можливість конструювання багатоцільових, багатофункціональних радіолокаційних станцій (РЛС).

Забезпечується висока надійність антени шляхом застосуванням спеціальних систем контролю працездатності фазованої антенної решітки, що дозволяють швидко знайти місця пошкоджень.

Аналіз літературних джерел (наприклад, [1–4] та ін.) показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Формування мети. Метою даної наукової статті є дослідження параметрів діаграми направленості плоскої рівноамплітудної еквідистантної фазованої антенної решітки залежно від довжини електромагнітної хвилі, кількості $M \times N$ випромінюючих елементів, відстані між ними при заданому куті діаграми направленості ФАР.

Результати дослідження. Для формування необхідної зони покриття фазованої антенної решітки можуть використовуватися масиви елементів на основі лінійних, кругових, плоских антенних решіток. При цьому необхідно враховувати параметри діаграми направленості фазованої антенної решітки: рівні бічних пелюсток, ширину головної і бічних пелюсток залежно від довжини електромагнітної хвилі, числа елементів у ФАР та відстані між ними [1].

Розглянемо двомірний масив з $M \times N$ випромінюючих елементів (рис. 1).

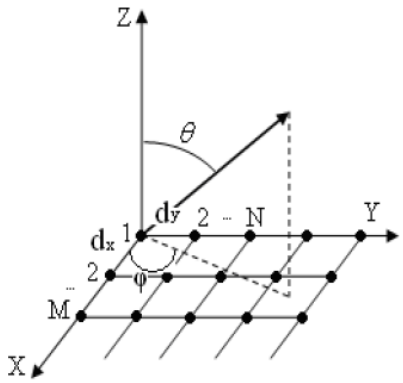


Рис. 1. Двомірний масив випромінювачів з *M*×*N* елементів

Функція $F_p\left(\theta,\varphi_0\right)$ характеризує спрямовані властивості системи з $M \times N$ випромінюючих елементів. Цю функцію також називають множником решітки[1]:

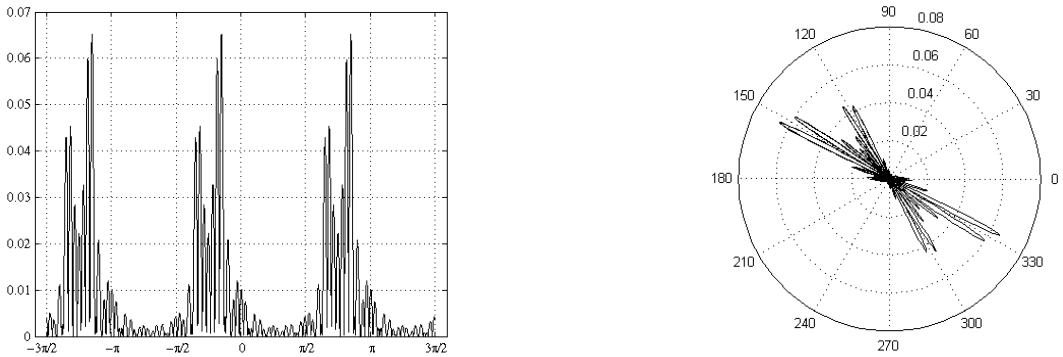
$$F_p\left(\theta,\varphi_0\right)=\frac{1}{M}\left|\frac{\sin\left[\frac{M}{2}kd\cos\varphi_0(\sin\theta-\sin\theta_0)\right]}{\sin\left[\frac{kd}{2}\cos\varphi_0(\sin\theta-\sin\theta_0)\right]}\right|\times\frac{1}{N}\left|\frac{\sin\left[\frac{N}{2}kd\sin\varphi_0(\sin\theta-\sin\theta_0)\right]}{\sin\left[\frac{kd}{2}\sin\varphi_0(\sin\theta-\sin\theta_0)\right]}\right|, \quad (1)$$

де M, N – кількість випромінюючих елементів в антенній решітці; $k=2\pi/\lambda$ – хвильове число вільного простору; d – відстань між випромінюючими елементами решітки; θ – зенітний кут; θ_0, φ_0 – кути, які відповідають напрямку максимального випромінювання.

Для дослідження основних властивостей множника антенної решітки складемо в середовищі MATLAB файл-програму Untitled1.m [2], в якій відстань між елементами $d=\lambda/2$ та будемо змінювати кількість випромінюючих елементів $M \times N$=20, $M \times N$=40, $M \times N$=60 (рис. 2, рис. 3, рис. 4).

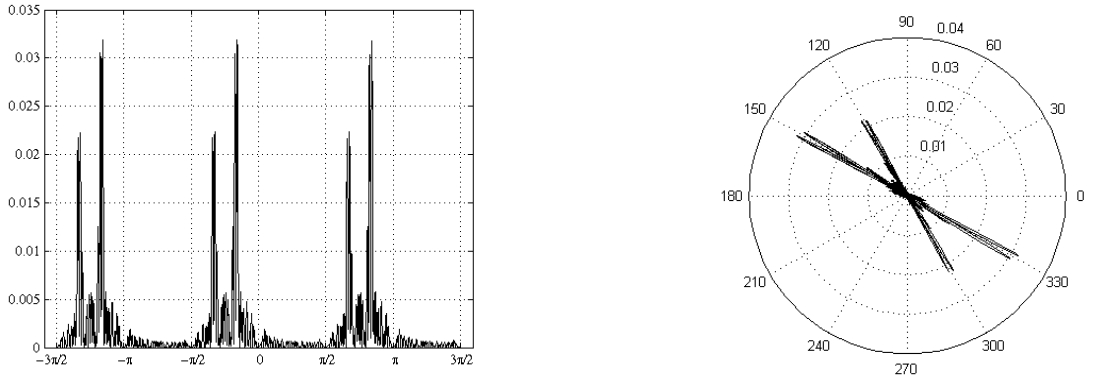
Використовуючи файл-програму Untitled1.m, розглянемо антенну решітку із елементів $M \times N$=20, $M \times N$=40, $M \times N$=60, рознесених на відстань $d=\lambda/4$ (рис. 5, рис. 6, рис. 7).

Рисунки 2а, 3а, 4а, 5а, 6а, 7а ілюструють діаграму направленості плоских антенних решіток в прямокутній системі координат при куті нахилу максимального випромінювання. На рисунках 2б, 3б, 4б, 5б, 6б, 7б представлені ДН плоских антенних решіток у полярній системі координат [1].



а **б**

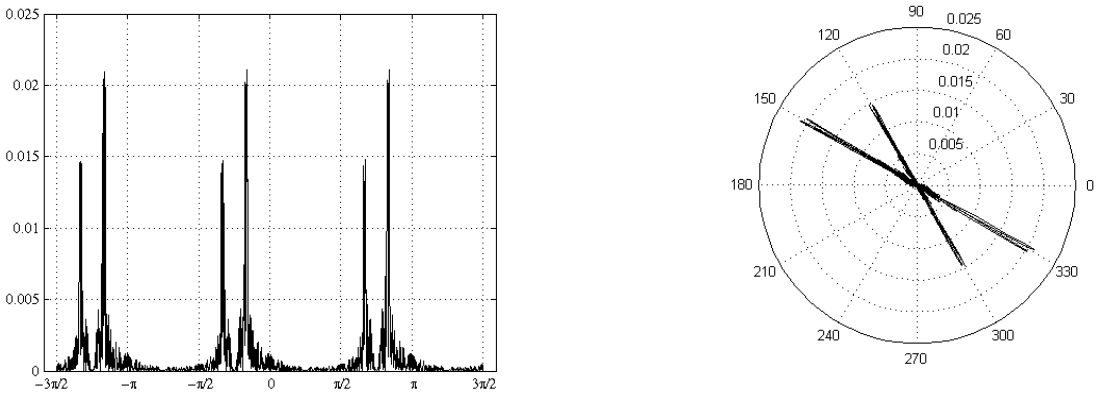
Рис. 2. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат для $M \times N = 20, \lambda = 0.2$ м, $d=\lambda/2$, $\theta_0=-\pi/6$



а б

Рис. 3. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

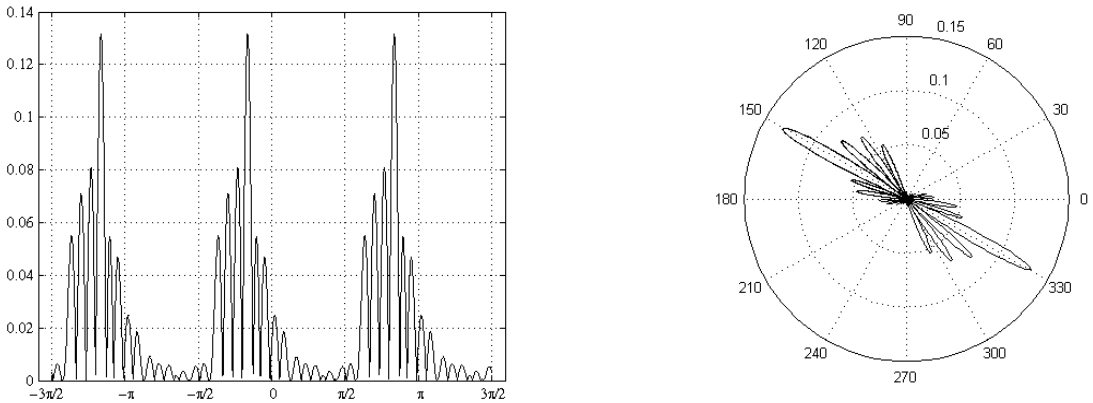
для $M \times N = 40$, $\lambda = 0.2$ **м,** $d = \lambda / 2$, $\theta_0 = -\pi / 6$



а б

Рис. 4. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

для $M \times N = 60$, $\lambda = 0.2$ **м,** $d = \lambda / 2$, $\theta_0 = -\pi / 6$

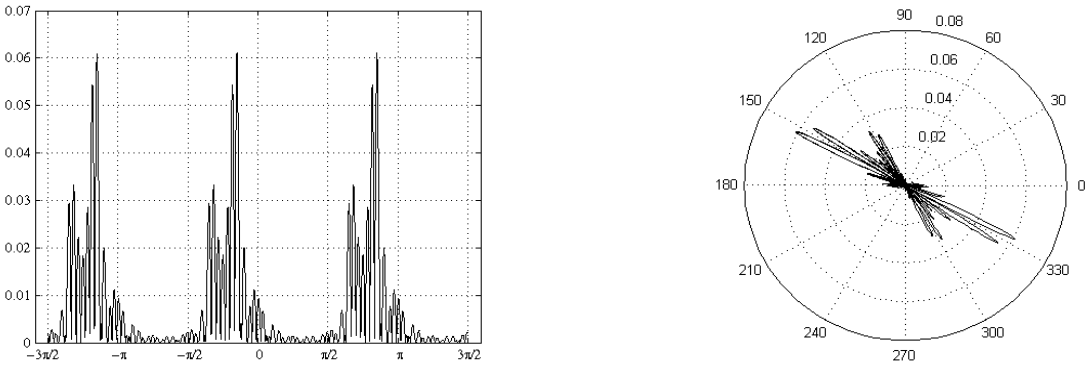


а б

Рис. 5. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

для $M \times N = 20$, $\lambda = 0.2$ **м,** $d = \lambda / 4$, $\theta_0 = -\pi / 6$

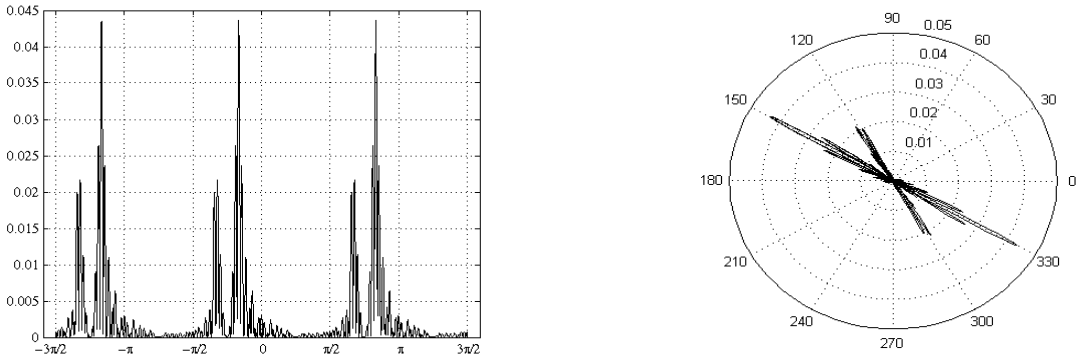
Якщо проаналізувати отримані рисунки (рис. 2–7), то видно, що ширина головної пелюстки ДН антенної решітки при незмінній довжині хвилі залежить від кількості елементів (M і N) і відстані між ними. Чим більша відстань між випромінюючими елементами і чим більше елементів в решітці, тим вужча ширина головної пелюстки ДН. Проте, слід пам'ятати, що якщо відстань між сусідніми випромінюючими елементами решітки становить більше половини довжини хвилі, в ДН з'являються бічні пелюстки, максимуми яких рівні по амплітуді максимуму головної пелюстки [4].



а б

Рис. 6. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

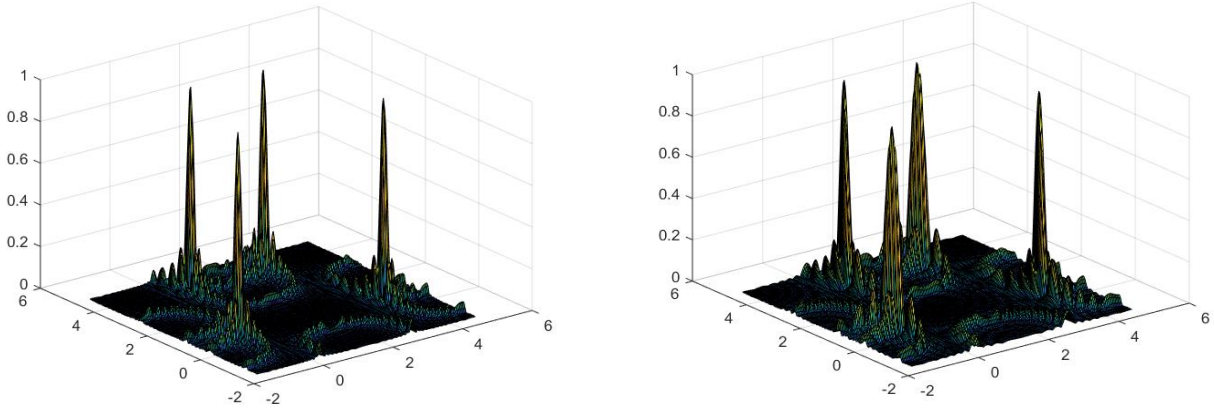
для $M \times N = 40, \lambda = 0.2$ **м,** $d = \lambda / 4,\ \theta_0 = -\pi / 6$



а б

Рис. 7. Множник решітки в прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

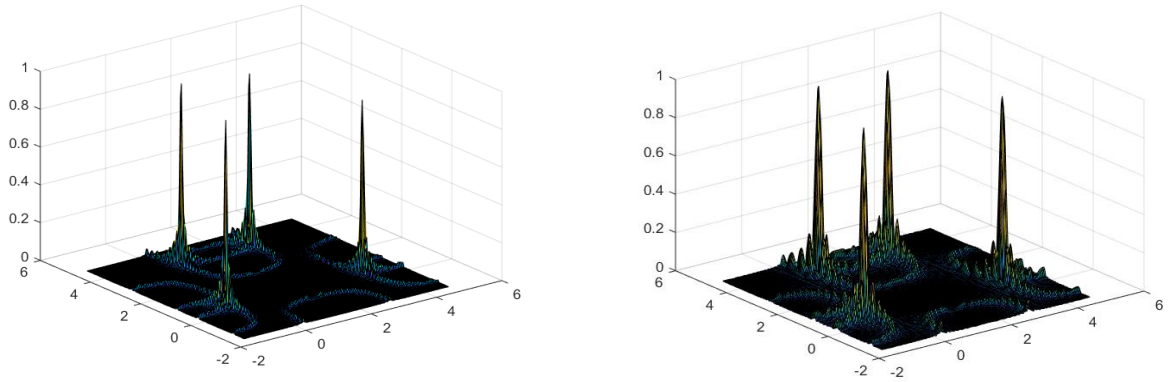
для $M \times N = 60, \lambda = 0.2$ **м,** $d = \lambda / 4,\ \theta_0 = -\pi / 6$



а б

Рис. 8. Нормована ДН фазованої антенної решітки в тривимірному просторі

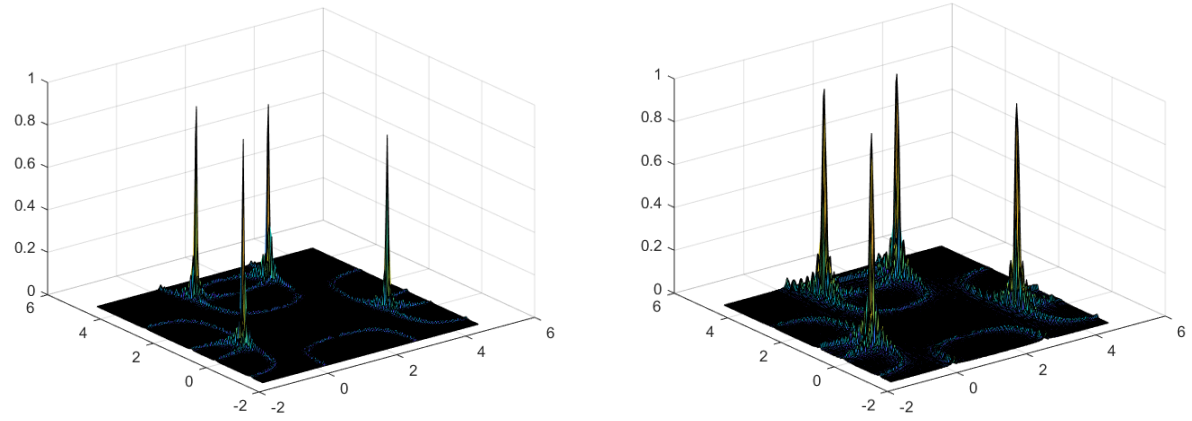
для $M \times N = 20, \theta_0 = -\pi / 6 : d = \lambda / 2$ **(а);** $d = \lambda / 4$ **(б)**



а б

Рис. 9. Нормована ДН фазованої антенної решітки в тривимірному просторі

для $M \times N = 40,\ \theta_0 = -\pi / 6 : d = \lambda / 2$ **(а);** $d = \lambda / 4$ **(б)**



а б

Рис. 10. Нормована ДН антенної решітки в тривимірному просторі
для $M \times N = 60, \theta_0 = -\pi / 6 : d = \lambda / 2$ **(а);** $d = \lambda / 4$ **(б)**

Нормована функція множника антенної решітки в логарифмічному масштабі визначається виразом [4]:

$$G(\theta, \varphi) = 20\lg\left(F(0,0) / F(\theta, \varphi)\right), \tag{2}$$

де $F(0,0)$ – амплітуда головної пелюстки, $F(\theta, \varphi)$ – амплітуда бічної пелюстки.

На основі виразу, що описує діаграми направленості ФАР можливо отримати параметри її бічних пелюсток. Для знаходження амплітуди першої бічної пелюстки ДН в плоскій еквідистантній рівноамплітудній антенній решітці необхідно знайти рішення рівняння $\frac{dG(\theta,0)}{d\theta} = 0$, де $G(\theta, \varphi)$ – вираз (2).

Для аналізу рівня бічних пелюсток зручно використовувати відношення амплітуди основної пелюстки ДН до амплітуди бічної пелюстки, яке позначається терміном sideloberatio (SLR) і вимірюється в децибелах. Значення SLR дозволяє оцінити рівень головної пелюстки ДН щодо бічної [3].

Вираз для визначення SLR:

$$SLR_n = 20 \cdot \log\left(\frac{F(0,0)}{F(\theta_{бп_n}, 0)}\right) = 1 - G(\theta_{бп_n}, 0), \text{ дБ}, \tag{3}$$

де $\theta_{бп_n}$ – кут, при якому амплітуда n-ї бічної пелюстки ДН досягає максимуму.

Результати моделювання для кількості випромінюючих елементів $M \times N$=20, $M \times N$=40, $M \times N$=60 та $d = \lambda / 2$, а також для $d = \lambda / 4$ (табл. 1) за виразом (3) в пакеті програми MathCAD [2] показують, що при збільшенні кількості випромінюючих елементів для першої правобічної і лівобічної пелюсток SLR_1 поступово буде зменшуватися (рис. 11), а при великій кількості елементів в решітці $(M = N > 60)$, значення SLR_1 діаграми направленості антенної решітки залишається незмінним, незалежно від напрямку головної пелюстки ФАР, і приблизно дорівнює 13,5 дБ [3].

Таблиця 1

Значення SLR лівобічних і правобічних пелюсток від кількості елементів в ФАР

Кількість елементів у ФАР, $M \times N$	SLRл лівобічної пелюстки, дБ	SLRп правобічної пелюстки, дБ
для $d = \lambda / 2$		
20	0,974	22,412
40	0,276	16,124
60	0,828	14,593
для $d = \lambda / 4$		
20	10,2	13,563
40	10,602	23,452
60	4,242	5,265

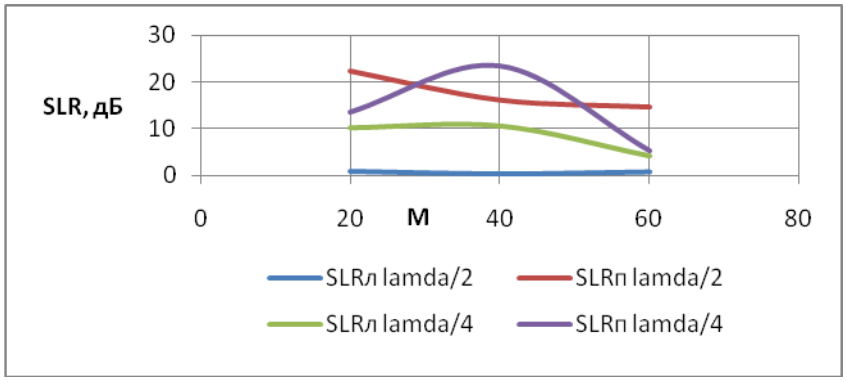


Рис. 11. Залежність SLR_1 від кількості елементів *M*×*N* при $d = \lambda / 2$ та $d = \lambda / 4$

Ширина головної пелюстки діаграми направленості [3]:

$$BW_0 = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{Md}\right), \text{ рад.} \tag{4}$$

Ширина бічних пелюсток діаграми направленості:

$$BW_1 = \arcsin\left(\frac{2\lambda}{Md}\right) - \arcsin\left(\frac{\lambda}{Md}\right), \text{ рад.}$$

$$BW_2 = \arcsin\left(\frac{3\lambda}{Md}\right) - \arcsin\left(\frac{2\lambda}{Md}\right), \text{ рад.} \tag{5}$$

$$\ldots$$

$$BW_N = \arcsin\left(\frac{(\mathrm{N}+1)\cdot\lambda}{Md}\right) - \arcsin\left(\frac{\mathrm{N}\cdot\lambda}{Md}\right), \text{рад.}$$

Так як сумарний рівень перших п'яти бічних пелюсток перевищує сумарний рівень наступних п'яти бічних пелюсток на 10 дБ, впливом далеких пелюсток (починаючи з 6-ї) можна знехтувати [3].

Результати розрахунків для кількості елементів *M*×*N*=20, *M*×*N*=40, *M*×*N*=60 для $d = \lambda / 2$, за виразами (4) і (5), які отримали, використовуючи пакет програми MathCAD [4], наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення ширини головної та бічних пелюсток залежно від кількості випромінюючих елементів у ФАР

Кількість елементів у ФАР, *M*×*N*	BW_0, рад	BW_1, рад	BW_2, рад	BW_3, рад	BW_4, рад	BW_5, рад
20	0.201	0.102	0.104	0.107	0.113	0.012
40	0.101	0.0502	0.0504	0.0508	0.0514	0.0521
60	0.067	0.0334	0.0335	0.0336	0.0338	0.034

Ширина головної пелюстки множника рівноамплітудної антенної решітки визначається виразами:

$$2\theta_{0,5} = 0{,}88\frac{\lambda}{Nd}, \text{ рад.} \tag{6}$$

$$2\theta_{0,5} = 51°\frac{\lambda}{Nd}, \text{ рад.} \tag{7}$$

Відповідно до формул (6) і (7) проведені розрахунки щодо ширини головної пелюстки діаграми направленості антенної решітки для кількості випромінюючих елементів *M*×*N*=20, *M*×*N*=40, *M*×*N*=60 для $d = \lambda / 2$ та $d = \lambda / 4$, результати яких наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення ширини головної пелюстки ДН антенної решітки залежно від кількості випромінюючих елементів та відстані між ними

Кількість випромінюючих елементів АР, *M*×*N*	Ширина головної пелюстки ДН, $2\theta_{0,5}$	
	$d = \lambda / 2$	$d = \lambda / 4$
20	5,1° (0,088 рад)	10,2° (0,176 рад)
40	2,55° (0,044 рад)	5,1° (0,088 рад)
60	1,7° (0,029 рад)	3,4° (0,059 рад)

Висновки

Для плоскої еквідистантної рівноамплітудної фазованої антенної решітки $M \times N$=20 кількість бічних пелюсток, які знаходяться між сусідніми головними пелюстками буде 14 (N-6); для $M \times N$=40 кількість бічних пелюсток буде 28 (N-12); а при $M \times N$=60 кількість бічних пелюсток буде 42 (N-18).

Для антенної решітки ($d = \lambda / 2$) при збільшенні кількості випромінюючих елементів ($M \times N$) відношення амплітуди головної пелюстки до амплітуди бічної пелюстки буде зменшуватися. При збільшенні кількості випромінюючих елементів в 3 рази, SLR правобічної пелюстки зменшується в 2,46 рази, а лівобічної пелюстки зменшиться в 1,02 рази. Для антенної решітки ($d = \lambda / 4$) при збільшені кількості випромінюючих елементів ($M \times N$) також в 3 рази, SLR правобічної пелюстки зменшується в 2,6 рази, а лівобічної пелюстки зменшиться в 1,99 рази.

Чим більша відстань між випромінюючими елементами і чим більше елементів в антенній решітці, тим вужча ширина головної пелюстки діаграми направленості антени. Так, при $d = \lambda / 2$, $d = \lambda / 4$ і збільшенні випромінюючих елементів АР в 3 рази (з 20 до 60) ширина головної пелюстки ДН антенної решітки стає вужчою в 3 рази.

Антенна решітка з кількістю випромінюючих елементів $M \times N$=60, $d = \lambda / 2$ буде формувати найвужчий промінь головної пелюстки діаграми направленості антени $2\theta_{0,5}$ =1,7° (0,029 рад).

Звуження ширини головної пелюстки діаграми направленості фазованої антенної решітки надає змогу збільшити роздільну здатність виявлення повітряної цілі по азимуту РЛС, збільшує дальність виявлення цілі, збільшується дальність передачі інформації та знижується стале споживання приймачем електричної енергії.

Література

1. Сукачёв Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.

2. Mailloux, R. J. Phased array antenna handbook : 2nd ed. / R. J. Mailloux. – London : Artech House, 2005. – 506 с.

3. Гениатулин, К. А. Методика определения влияния боковых лепестков цифровой антенной решетки при частотно-территориальном планировании системы подвижной спутниковой связи / К. А. Гениатулин // Современные проблемы телекоммуникаций : мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск : Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2012. – С. 118-119.

4. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки / Хансен Р.С. – Второе издание. – М. : Техносфера, 2012. – 560 с.

References

1. Sukachyov E.A. Sotovye seti radiosvyazi s podvizhnymi obektami : ucheb. posob. / Sukachev E.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 c.

2. Mailloux, R. J. Phased array antenna handbook : 2nd ed. / R. J. Mailloux. – London : Artech House, 2005. – 506 c.

3. Geniatulin, K. A. Metodika opredeleniya vliyaniya bokovyh lepestkov cifrovoj antennoj reshetki pri chastotno-territorialnom planirovanii sistemy podvizhnoj sputnikovoj svyazi / K. A. Geniatulin // Sovremennye problemy telekommunikacij : mat-ly Ross. nauchn.-tehn. konf. – Novosibirsk : Sib. gos. un-t telekommunikacij i informatiki, 2012. – C. 118-119.

4. Hansen R.S. Fazirovannye antennye reshetki / Hansen R.S. – Vtoroe izdanie. – M. : Tehnosfera, 2012. – 560 s.

Рецензія/Peer review : 14.11.2019 р. Надрукована/Printed : 04.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-168-171
УДК 621.319:539.4

М.С. МОЯРЕНКО, В.П. РОЙЗМАН, А.В. ГОРОШКО
Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМ І ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ

Узагальнено проблему зниження вібрацій елементів конструкцій електронної техніки, виявлено виділено невирішену проблему визначення їх власних частот коливання. Розроблені методи і засоби експериментального визначення власної частоти коливань друкованих плат і мікромодулів з використанням прямого і зворотного п'єзоефекту, а також розвинутий і модифікований метод Гука-Хладні. Експериментально визначено, що щільний спектр власних частот коливань виробів РЕА залежить від конструкторських особливостей встановлених на них мікромодулів. Встановлено, що на амплітуду і форму коливань мікромодулів впливає їх конструкторсько-технологічне виконання. Обґрунтовано необхідність урахування розташування об'єднувальних плат, а також розташованих на них мікромодулів по поверхні пристосування, оскільки від цього залежить рівень їх амплітуд коливань. Проведені експериментальні дослідження ефективності застосування кубічного пристосування кріплення.

Ключові слова: власна частота, вібрації, друковані плати, мікромодуль, п'єзоефект, метод Гука-Хладні.

M.C. MOIARENKO, V.P. ROYZMAN, A.V. GOROSHKO
Khmelnytskyi National University

DETERMINATION OF FORMS AND FREQUENCY OF VIBRATIONS OF PRINTED CIRCUITS OF ELECTRONIC EQUIPMENT BY EXPERIMENTAL METHODS

Generalized problem of vibration reduction of elements of electronic engineering structures, identified an unresolved problem of determining their own oscillation frequencies. Methods and tools for experimental determination of the natural oscillation frequency of printed circuit boards and micromodules using direct and inverse piezoelectric effects have been developed, as well as a developed and modified Hook-Cool method. It is experimentally determined that the dense spectrum of natural oscillation frequencies of REA products depends on the design features of the micromodules installed on them. It is established that the amplitude and form of oscillations of micromodules are influenced by their design and technological execution. The experimental data obtained indicate the need to take into account the location of the motherboards, as well as the micromodules located on them on the surface of the device, since the level of their amplitude of oscillations depends on it. Experimental studies of the effectiveness of the use of the cubic fixture.

Keywords: self oscillation frequency, vibration, circuit boards, micromodule, piezo effect, Hook-Chladni method.

Постановка проблеми. Під час експлуатації електронних пристроїв, розташованих на мобільних об'єктах, особливо на таких, які швидко переміщуються (літаки, ракети тощо), їх елементи, функціональні вузли і друковані плати піддаються впливу ударних та динамічних навантажень, зокрема вібрацій. Основними зовнішніми для радіоелектронної апаратури (РЕА) джерелами вібрацій на літаках є повітряні тягові гвинти, реактивні двигуни, віброударів – турбулентності повітряного середовища, ударів – жорсткі посадки. Вібрації є причинами підвищення інтенсивності відмови за рахунок механічного руйнування елементів конструкцій та спотворення параметрів електричних сигналів [1]. Дослідження, направлені на розробку методів і засобів зниження вібрацій РЕА, є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для складних електронних конструкцій РЕА через резонансні явища вібрації окремих плат і змонтовані на них елементи можуть у багато разів перевищувати вібрації місць кріплення апаратури і викликати поломки [2]. З цієї причини значна частина [3] таких друкованих плат виходить з ладу, а тому дослідження, направлені на пошук причин і появи небезпечних вібрацій в платах, а також розробка і застосування спеціальних заходів з захисту апаратури від механічних впливів, є актуальною науковою проблемою. Однією із задач для її вирішення є визначення власних частот коливань елементів РЕА. При цьому аналітичний розрахунок власних частот друкованих плат дає надійний результат лише для найпростіших конструкцій, таких як прямокутні плати з кріпленням по контуру, яке розглядають як вільне опирання і жорстке закріплення [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У роботах [5-10] автори допускають, що елементи РЕА рівномірно розподілені по площі плати. Тому у всіх інших випадках аналітичні методи розрахунку дають недопустимо велику похибку під час визначення власної частоти коливань. Експериментальне визначення динамічних характеристик друкованих плат зазвичай проводиться на віброустановці і вимагає певного досвіду, великих витрат електричної енергії. При цьому оператор знаходиться під впливом електромагнітних полів і шумів різної інтенсивності.

Через це перспективним видається розробка експериментальних методів визначення власної частоти коливань функціональних плат РЕА, позбавлених цих недоліків.

Результати досліджень. В роботі представлена експериментальна установка для визначення форм і частот коливань друкованих плат електронної техніки. Установка (рис. 1) містить масивну підставку 1 і чотири (або шість) стійок 2.

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

збудження механічних коливань плати використовується зворотний п'єзоелектричний ефект [11]. 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 осцилографа і електронного частотоміру (цифрового).

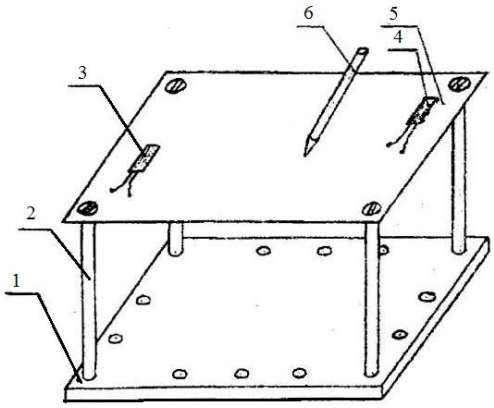


Рис. 1. Установка для експериментального визначення форм і частот коливань плат

Про резонанси плати судять за максимальним значенням амплітуди напруги другого п’єзокристала, а про форму – шляхом обходу плати п’єзощупом або п’єзоолівцем 6.

Переваги даної установки полягають у тому, що тут не потрібна висока кваліфікація обслуговуючого персоналу, витрати електричної енергії є невеликими, 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.

Основа виготовляється зі сталі або чавуну, стійки – зі сталі. Якщо ж плата у РЕА кріпиться іншим способом, то замість стійок 2 на підставку встановлюються опори, що відповідають тим чи іншим умовам закріплення.

Показана на рис. 1 установка була багаторазово використана при вібродослідженнях низки плат і корпусних деталей електронної техніки. Перевага цього методу полягає в тому, що він дає можливість визначення форм і частот коливань не лише в лабораторних умовах, а й безпосередньо на місці установки апаратури.

Для визначення форм коливань функціональних плат, корпусних деталей, мікромодулів та інших деталей пропонується також наступний, розвинутий і модифікований метод Гука-Хладні.

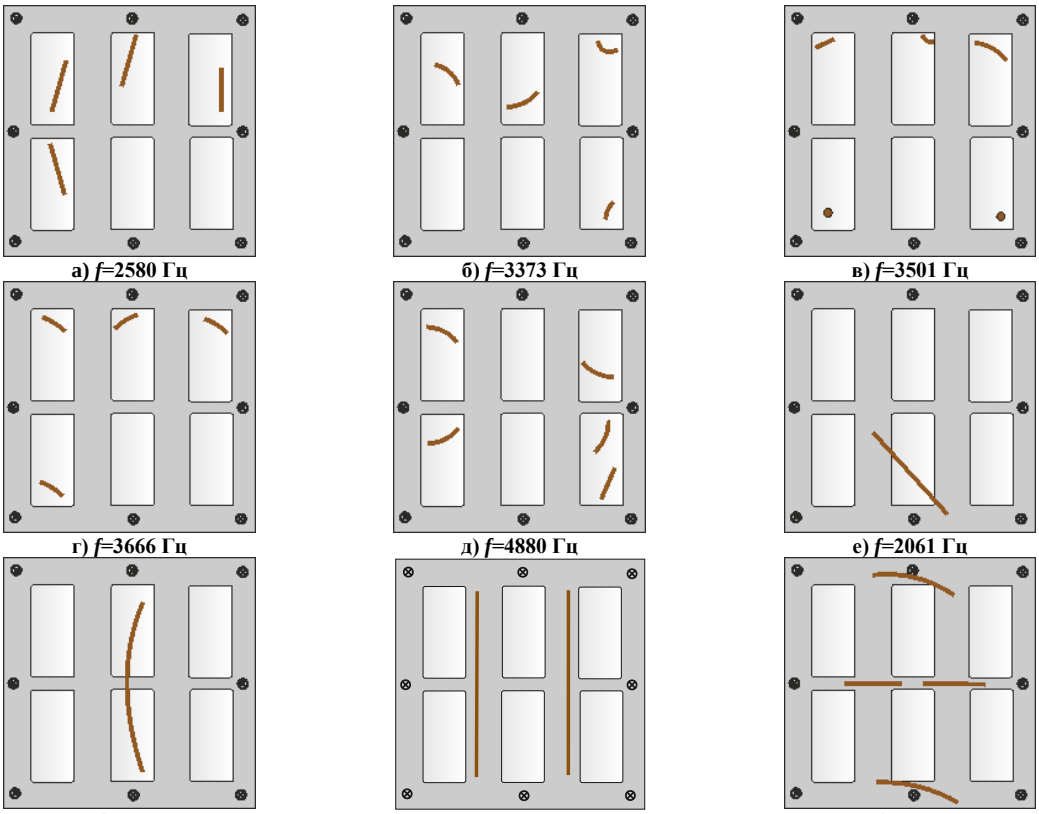


Рис. 2. Форми коливань горизонтально розташованої плати зі встановленими зверху мікромодулями 4У21, які відповідають частоті коливань

Змочену гасом поверхню досліджуваної деталі (плати, мікромодуля та ін.) посипають дрібним кварцом. Змінюючи частоту вимушених коливань, помічають, що при деяких частотах амплітуди коливань різко зростають. Це вказує на збіг частот збурювальних навантажень і власних частот коливань, тобто на резонанс. При цьому з місць пучності коливань піщинки скидаються в ті місця, де плата (мікромодуль) є нерухомою, тобто у вузли коливань. Там піщинки залишаються в спокої, позначаючи вузли коливань. У цих

місцях і виникають найбільші напруження. Даним методом були визначені форми і частоти коливань функціональних плат з мікромодулів 4-го типорозміру для чотирьох варіантів розташування плати, а також визначені форми і частоти коливань корпусних деталей базової несучої конструкції в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

На кожній об’єднувальній платі встановлювали по три мікромодуля трьох типорозмірів: 4У21 (1, 2), 3У41 (3, 4), 1П59 (5, 6), як в горизонтальному, так і в вертикальному положеннях. Зазначені мікромодулі монолітної конструкції відрізняються один від одного пружними та інерційними характеристиками. Так, наприклад маса ММ 4У41 складає 80 г, 3У41 – 100 г, а 1П59 – 60 г.

Далі визначалися власні частоти, форми і амплітуди коливань обраних об'єднувальних плат у діапазоні частот коливань 2000–5000 Гц, який відповідає умовам експлуатації блоку РЕА на літаку. Результати випробувань об'єднувальних плат, що містять мікромодулі 4У21, наведені у вигляді форм коливань (фігур Хладні) (рис. 2), а також амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) плат (рис. 3), які побудовані за середніми значеннями амплітуд коливань плат $A_{пл}$ і мікромодулів $A_{мод}$. Під час визначення амплітуд коливань мікромодулів враховувалася нерівномірність розподілу віброперевантажень по площі рухомої платформи. Для мікромодулів 3У41 і 1П59 отримані аналогічні результати, тому вони тут не наводяться.

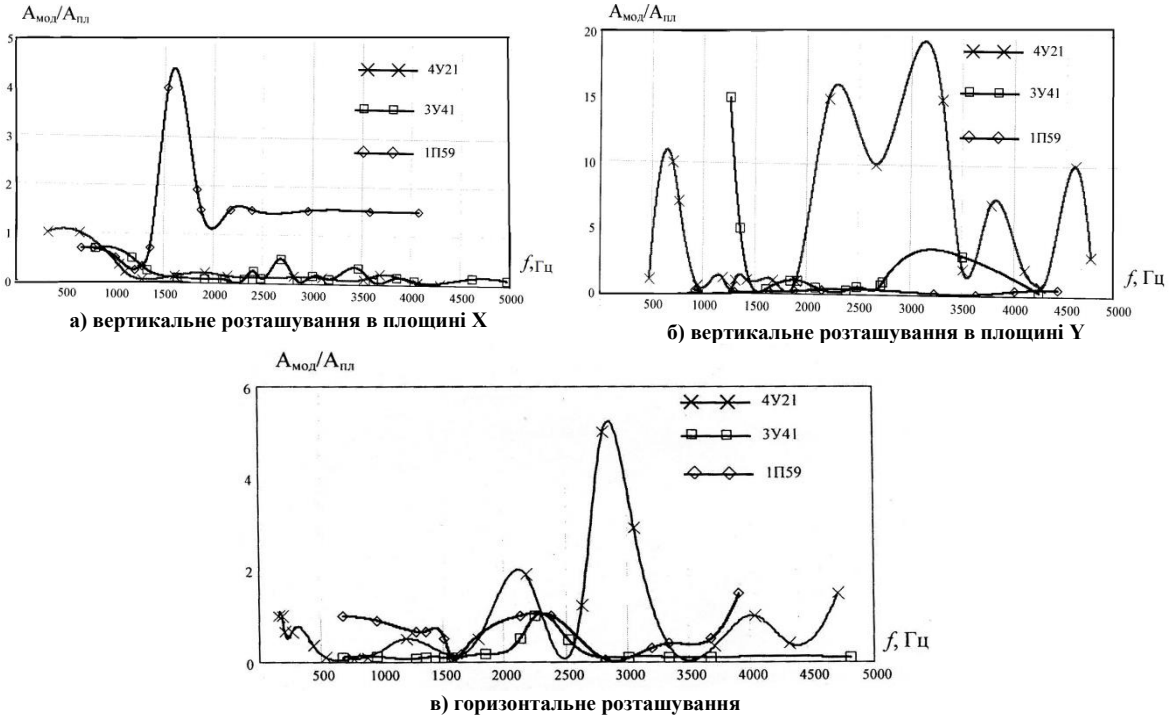


Рис. 3. АЧХ мікромодулів при розташуванні об'єднувальної плати на поверхні хрестоподібного пристосування

Експериментальні АЧХ (рис. 3) свідчать про те, що найбільш чутливими до резонансних станів є об'єднувальні плати, встановлені в пристосуванні вертикально, а найменш – горизонтально. Це пояснюється тим, що в залежності від того, як розташовані плати з мікромодулів – вертикально або горизонтально, пружні характеристики об'єктів дослідження будуть відрізнятися. Крім того, отримані експериментальні результати вказують на те, що є щільний спектр власних частот коливань виробів РЕА, який залежить від конструкторських особливостей встановлених на них мікромодулів.

Отримані фігури Хладні показують, що об'єкти дослідження мають складні форми коливань, що свідчать про складний деформаційний стан як самих плат, так і встановлених на них мікромодулів.

Слід відзначити той факт, що картина нерівномірності розподілу віброперевантажень і, як наслідок, амплітуд коливань об'єднувальних плат, поверхні хрестоподібного пристосування була аналогічною для такої, отриманої по поверхні рухомої платформи вібростенда. Це може свідчити про те, що нерівномірності розподілу віброперевантажень рухомої платформи вібростенда переходять на поверхню пристосування і, як наслідок, – на об'єкти дослідження.

З огляду на отримані нерівномірності розподілу віброперевантажень були проведені випробування об'єднувальних плат з мікромодулів 4У21, 3У41 і 1П59 з використанням для їх кріплення кубічного пристосування. На рис. 3 представлені результати випробувань мікромодулів типу 4У21 у вигляді АЧХ плат. Для мікромодулів 3У41 і 1П59 отримані аналогічні результати.

Представлені на рис. 3 експериментальні дані свідчать про те, що запропонована конструкція кубічного пристосування, в порівнянні з хрестоподібним, призводить до істотного зниження амплітуди коливань мікромодулів. При цьому, за трьома взаємно перпендикулярним площинами пристосування спостерігається різний ступінь зниження амплітуд коливань.

Висновки

Розроблені методи експериментального визначення власної частоти коливань друкованих плат РЕА з використанням прямого і зворотного п'єзоефекту, а також розвинутий і модифікований метод Гука-Хладні показали свою ефективність на практиці. З представлених експериментальних результатів можна зробити висновок, що на амплітуду і форму коливань мікромодулів впливає їх конструкторсько-технологічне виконання. Отримані експериментальні дані свідчать про необхідність урахування розташування об'єднувальних плат, а також розташованих на них мікромодулів по поверхні пристосування, оскільки від цього залежить рівень їх амплітуд коливань. Проведені експериментальні дослідження показують, що застосування кубічного пристосування кріплення виробів РЕА дозволяє узгодити спектри його прискорень і рухомої платформи вібростенда.

Література

1. Кутровский П. В. Исследование и разработка виброзащиты радиотехнических устройств методом частотной отстройки : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» / П. В. Кутровский – Владимир, 2009. – 136 с.
2. Ковтун Л.О. Исследование влияния вибраций на работу функциональных плат РЕА / Л.О. Ковтун, В. П. Ройзман, А.К. Яновицкий // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1. – С. 64–71.
3. Механика в электронике : [в 3 т.] / В. П. Ройзман. – Хмельницкий : ХНУ, 2015.
4. Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий / Талицкий Е.Н. – Владимир, 2001. – 253 с.
5. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Пановко Я.Г. – М. : Наука, 1980. – 270 с.
6. Токарев М.Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.А. Фролов. – М. : Радио и связь, 1984. – 223 с.
7. Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры / Карпушин В.Б. – М. : Сов. радио, 1977. – 320 с.
8. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / под ред. Р. Г. Варламова. – М. : Сов. Радио, 1980. – 480 с.
9. Барашков В.А. Механические воздействия и защита электронных средств : учеб. пособие / А.А. Левецкий. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. – 122 с.
10. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / Ильинский В.С. – М. : Радио и связь, 1982. – 296 с.
11. Нестер Н. А., Ройзман В. П., Хавкин М. И. 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.

References

1. Kutrovskij P. V. Issledovanie i razrabotka vibrozashity radiotehnicheskih ustrojstv metodom chastotnoj otstrojki : avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.12.04 «Radiotehnika, v tom chisle sistemy i ustrojstva televideniya» / P. V. Kutrovskij – Vladimir, 2009. – 136 s.
2. Kovtun L.O. Issledovanie vliyaniya vibracij na rabotu funkcionalnyh plat REA / L.O. Kovtun, V. P. Rojzman, A.K. Yanovickij // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 1. – S. 64–71.
3. Mehanika v elektronike : [v 3 t.] / V. P. Rojzman. – Hmelnickij : HNU, 2015.
4. Talickij E.N. Zashita elektronnyh sredstv ot mehanicheskih vozdejstvij / Talickij E.N. – Vladimir, 2001. – 253 s.
5. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mehanicheskih kolebanij / Panovko Ya.G. – M. : Nauka, 1980. – 270 s.
6. Tokarev M.F. Mehanicheskie vozdejstviya i zashita radioelektronnoj apparatury / M.F. Tokarev, E.N. Talickij, V.A. Frolov. – M. : Radio i svyaz, 1984. – 223 s.
7. Karpushin V.B. Vibroshumy radioapparatury / Karpushin V.B. – M. : Sov. radio, 1977. – 320 s.
8. Spravochnik konstruktora REA: Obshie principy konstruirovaniya / pod red. R. G. Varlamova. – M. : Sov. Radio, 1980. – 480 s.
9. Barashkov V.A. Mehanicheskie vozdejstviya i zashita elektronnyh sredstv : ucheb. posobie / A.A. Leveckij. – Krasnoyarsk : IPC KGTU, 2002. – 122 s.
10. Ilinskij B.C. Zashita REA i precizionnogo oborudovaniya ot dinamicheskih vozdejstvij / Ilinskij B.C. – M. : Radio i svyaz, 1982. – 296 s.
11. Nester N. A., Rojzman V. P., Havkin M. I. Primenenie pezokristallov dlya issledovaniya form i chastot kolebanij pechatnyh plat / N. A. Nester, V. P. Rojzman, M. I. Havkin // Teoriya i praktika konstruirovaniya i obespecheniya nadezhnosti i kachestva REA. – Moskva, 1978. − S. 100.

Рецензія/Peer review : 20.11.2019 р. Надрукована/Printed : 04.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-172-174
УДК 004.4+00.4.94+51-72+62-405.8

Д.В. БОНДАР, О.А. ПАСІЧНИК, Т.К. СКРИПНИК
Хмельницький національний університет

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ПРИ ОСАДЖЕННІ МІКРОЧАСТИНОК

Розроблено узагальнену модель осадження мікрочастинок; реалізовано програмний продукт для імітаційного моделювання формування поверхні в процесі осадження мікрочастинок, що забезпечує задання різних початкових законів розподілу; відслідковування результуючого закону розподілу; перевірку наявності наскрізних порожнин; оцінку якості поверхні осадженого шару.

Ключові слова: імітаційна модель, інформаційна система.

D.V. BONDAR, O.A. PASICHNYK, T.K. SKRYPNYK
Khmelnytskyi National University

INFORMATION SYSTEM OF IMITATION SIMULATION OF THE SURFACE FORMATION PROCESSING IN THE DEPOSITION OF MICROPARTICLES

Technological advances greatly contribute to the modelling and numerical study of deposition structures. Such studies help to develop a better understanding and control over the formation of specific shapes and surfaces, for specific purposes. This is relevant for the manufacture of nanomaterials used in industry, medicine and other fields. One of the current trends of technological development is to form on the surfaces of various coatings with special properties different from the properties of the main body part. A possible technology for obtaining such coatings is the technology of deposition of microparticles. The analysis shows a possible wide range of applications in the fields of science and technology, as well as objects of modelling. This result determines the potential need for a wide range of end-users in information technology. The purpose of this work is to create an information system that is designed to simulate the process of surface formation during particle deposition. To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks: development of a generalized model of microparticle deposition; implementation of information system for simulation modelling of surface formation in the process of deposition of microparticles, which provides the assignment of different initial distribution laws; tracking the resulting distribution law; checking the presence of through cavities; assessment of the surface quality of the deposited layer. As a result of the work, information technology was first developed using a generalized model that combines four types of particle deposition with an extended nomenclature of initial data in combination with the analysis of the original result.

Keywords: simulation model, information system.

Вступ

Розвиток інформаційних технологій та збільшення потужності обчислювальних машин дали змогу застосовувати їх у різних галузях. Одним із можливих напрямків є моделювання та пов'язане з ним дослідження структур поверхневих шарів отриманих шляхом осадження частинок. Такі дослідження допомагають краще зрозуміти та контролювати процес формування поверхонь. Моделювання поверхні також надає переваги для візуалізації даних. Ці дослідження мають практичне значення для різних галузей промисловості та сфер життєдіяльності людини. Тому створення інформаційної технології, що імітує процес осадження мікрочастинок, є актуальним для застосування у різних сферах.

Метою цієї роботи є створення інформаційної системи, яка призначена для імітації процесу формування поверхні при осадженні частинок.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: розробка узагальненої моделі осадження мікрочастинок; реалізація інформаційної системи для імітаційного моделювання формування поверхні в процесі осадження мікрочастинок, що забезпечує задання різних початкових законів розподілу; відслідковування результуючого закону розподілу; перевірка наявності наскрізних порожнин; оцінка якості поверхні осадженого шару. В результаті проведеної роботи вперше було розроблено інформаційну технологію, що використовує узагальнену модель, яка поєднує чотири типи осадження частинок з розширеною номенклатурою початкових даних у поєднанні з аналізом вихідного результату.

Основні матеріали дослідження

Комп'ютерне моделювання [1] – метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Однією з сучасних тенденцій розвитку техніки є формування на поверхнях деталей різноманітних покриттів зі спеціальними властивостями, що відрізняється від властивостей основного тіла деталі. Можливою технологією отримання такого роду покриттів є технологія осадження мікрочастинок.

Поверхневі та структурні властивості агрегатів осадження мають багатодисциплінарний інтерес. Осадження частинок відбуваються в різних фізичних, хімічних та біологічних системах і процесах. Поверхневі та об'ємні властивості агрегатів осадження (утвореної поверхні) тісно пов'язані з найрізноманітнішими проблемами, такими як потік рідини, адсорбція та дифузія в пористих структурах, спрямовані полімери у випадкових середовищах та розповсюдження полум'яних фронтів та інше.

Технологічний прогрес значною мірою сприяє моделюванню та чисельним дослідженням структур осадження. Такі дослідження допомагають розвинути краще розуміння та контроль за формуванням конкретних форм і поверхонь для конкретних цілей. Це актуально для виготовлення наноматеріалів, що застосовуються в промисловості, медицині та інших сферах.

Проведений аналіз засвідчує можливий широкий спектр застосування по галузям науки і техніки, так і по об'єктам моделювання. Такий результат обумовлює потенційну потребу широкого кола кінцевих споживачів в інформаційній технології. Серед комп'ютерних моделей виділяють моделі осаджень мікрочастинок, в яких частинки рухаються по прямолінійних траєкторіях і приєднуються до осаду, що попередньо агрегував за наявності прямого контакту.

Виділяють чотири основні типи осадження [2], разом вони охоплюють широке коло явищ реального світу. Ці чотири типи мають деякі спільні риси. Перш за все, осадження будується на одновимірній області, зі певною шириною [3]. У різні моменти часу невеликий об'єкт (зазвичай квадрат) з'являється над областю і падає вертикально вниз, на будь-який край. Що відбудеться в момент наближення, як будуть рости стеки об'єктів, залежить від того, який тип процесу осадження розглядається.

Перший тип осадження частинок – це модель випадкового осадження, її зображено на рис. 1а [4]. Це найпростіший з усіх процесів осадження. У цій моделі, під час процесу осадження, частинки однакового розміру рухаються вертикальними траєкторіями з випадково обраного положення над поверхнею осаду і осаджуються за наявності безпосереднього контакту з найближчою частинкою осаду, що знаходиться на поверхні. При цьому під "поверхнею" розуміють набір часток, що знаходяться в найвищому положенні в кожній колонці. Відсутність бічних взаємодій у даній моделі осадження призводить до формування рівномірної поверхні, по усій площі. Це означає, що за будь-якого вхідного закону розподілу вихідний закон буде завжди схожим.

У моделі випадкового осадження мікрочастинок товщина шару зростає найповільніше, але при цьому у ньому відсутні порожнини. Модель має найнижчу шорсткість утвореної поверхні, серед усіх чотирьох моделей, при рівномірному законі розподілу. Цей процес називається випадковим осадженням, але термін «випадковий» не є виправданим. Всі моделі, що розглядаються, є випадковими.

Другий тип – випадкове осадження зі зміщенням, його зображено на рис. 1б. Цей варіант цікавий тим, що об'єкт падає на незайняту ділянку, та потім падає в найближче місце, що має мінімальну висоту. Якщо падіння відбулося на місце з нижчими сторонами з обох боків, то об'єкт випадково визначить подальший шлях переміщення вниз. Об'єкт рухається шляхом найменшого опору при подоланні локальних перешкод. Відсутність бічних взаємодій у даній моделі осадження призводить до формування рівномірної поверхні, по усій площі. Це означає, що за будь-якого вхідного закону розподілу вихідний закон буде максимально схожим.

У моделі випадкового осадження мікрочастинок зі зміщенням товщина шару зростає повільно, як і в звичайному випадковому осадженні, також у ньому відсутні порожнини. Модель має низьку шорсткість утвореної поверхні, у порівнянні з іншими моделями, при рівномірному законі розподілу.

Третій та четвертий типи осадження – це балістичне осадження, вони зображені на рис. 1в [4] та 1г [4].

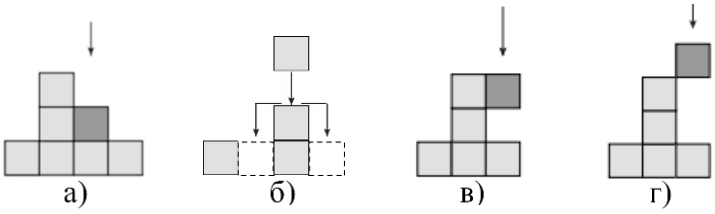


Рис. 1. Моделі осадження: а) та б) випадкове, в) та г) балістичне

Найбільш складним процесом осадження є балістичне [4]. Модель балістичного осадження мікрочастинок кардинально відрізняється від звичайного випадкового осадження та випадкового осадження зі зміщенням. При балістичному осадженні частинки вважаються сильно «магнітними» та «прилипають» до першої точки контакту, тоді як у випадковому осадженні частинки можуть продовжувати процес осадження далі.

У моделі балістичного осадження та моделі балістичного осадження зі зміщенням, під час процесу осадження частинки однакового розміру рухаються вертикальними траєкторіями з випадково обраного положення над поверхнею осаду та осаджуються за наявності безпосереднього контакту з найближчою частинкою осаду, що знаходиться на поверхні, у поточному стовпці. При наявності осаджених мікрочастинок у сусідніх стовпцях, частинка приєднується до першого доступного сусіда у балістичному осадженні та до наступного сусіда у балістичному осадженні зі зміщенням, за наявності безпосереднього бічного контакту з нею. Після аналізу чотирьох типів осадження мікрочастинок була розроблена узагальнена модель, яка поєднує у собі поведінку усіх зазначених варіантів.

Для моделювання згаданого процесу, імітації поверхні, була реалізована інформаційна система у вигляді оригінального програмного забезпечення, що імітує зазначений процес (рис. 2).

У програмному продукті реалізовано можливість обирати вхідний закон розподілу зі зміною масштабування (рис. 3).

Результатом роботи програми є імітація поверхні, що зображена на рис. 4.

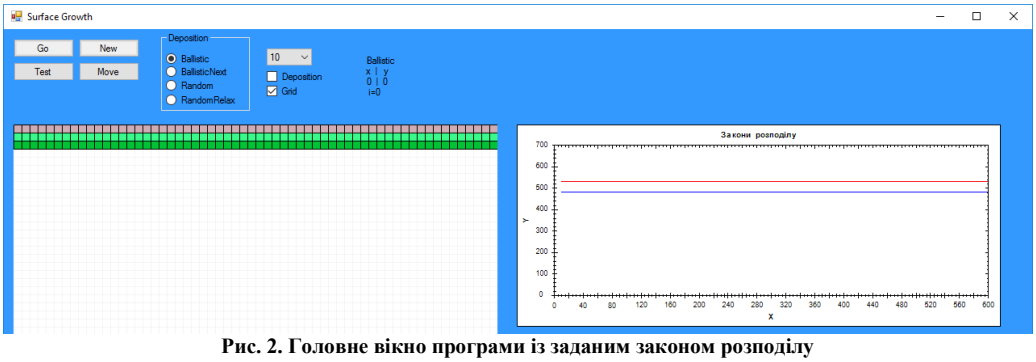


Рис. 2. Головне вікно програми із заданим законом розподілу

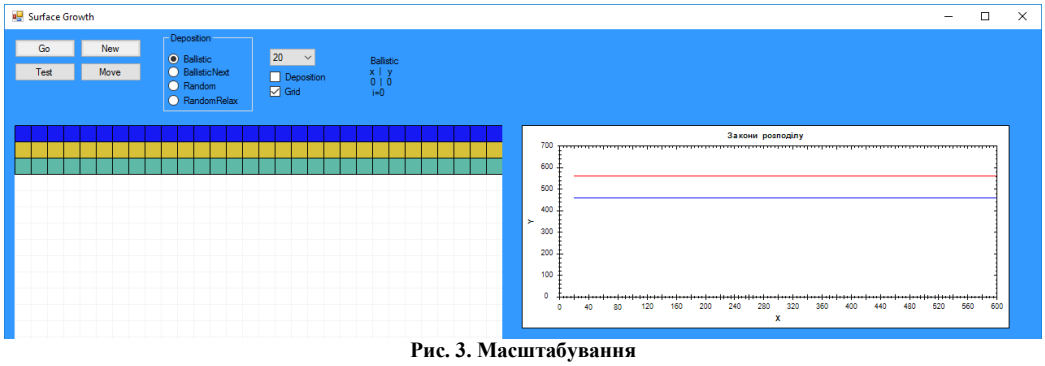


Рис. 3. Масштабування

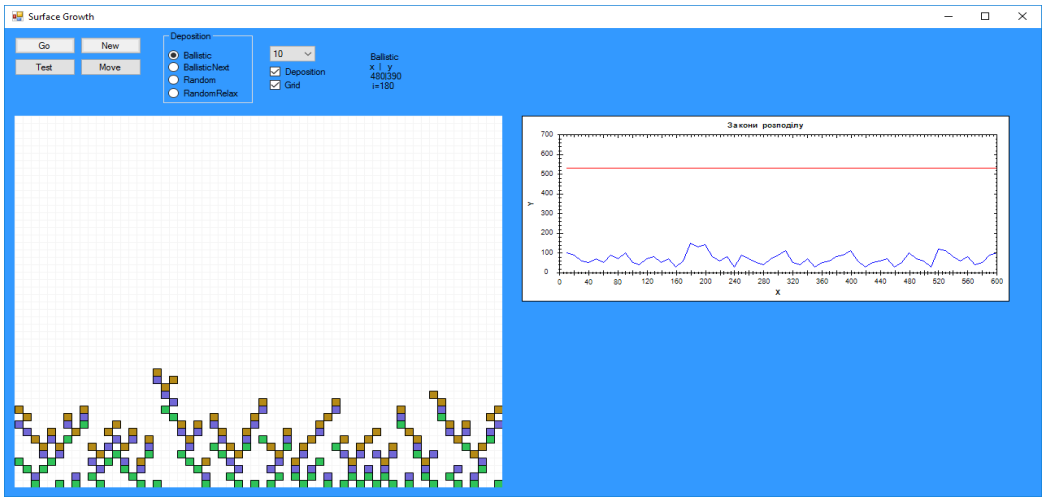


Рис. 4. Утворена поверхня

Висновки

Реалізовано інформаційну систему імітаційного моделювання формування поверхні в процесі осадження мікрочастинок, що ґрунтується на розробленій узагальненій моделі осадження мікрочастинок. В інформаційній системі забезпечено задання різних початкових законів розподілу; відслідковування результуючого закону розподілу; перевірку наявності наскрізних порожнин; оцінку якості поверхні осадженого шару.

Література

1. Моделювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://studopedia.org/4-170978.html.
2. Осадження [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ams.org/publicoutreach/feature-column/fc-2016-02.
3. Моделювання осадження [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://arxiv.org/pdf/1311.2182.pdf.
4. Surface morphology of a modified ballistic deposition model [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc4392/m2/1/high_res_d/problieu.pdf.

References

1. Modeling. URL: https://studopedia.org/4-170978.html.
2. Deposition. URL: http://www.ams.org/publicoutreach/feature-column/fc-2016-02.
3. Deposition modeling. URL: https://arxiv.org/pdf/1311.2182.pdf.
4. Surface morphology of a modified ballistic deposition model. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc4392/m2/1/high_res_d/problieu.pdf.

Рецензія/Peer review : 26.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-175-177
УДК 621.311.001.57

Д.Ю. ЗУБЕНКО, О.М. ПЕТРЕНКО
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) знаходять широке застосування на транспорті. Але способи охолодження PMSM все ще залишаються проблемою. У статті пропонується використання методу кінцевих елементів під час створення математичної моделі на ефекті перехідного охолодження. Змодельовані і проаналізовані умови різних теплових навантажень і різних температур навколишнього середовища. Розрахунки показують, що склавши модель нагрівання корпусу електродвигуна можна отримати оптимальний варіант для випробування нових і вже створених прототипів.

Ключові слова: *електричний транспорт, електродвигуни, математична модель, тепловийконтроль, діагностика, випробування.*

D. ZUBENKO, O. PETRENKO
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

MATHEMATICAL COOLING MODEL FOR SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in transportation. But the cooling strategy of the PMSM is still a problem. The article proposes the use of the finite element method when creating a mathematical model on the effect of transitional cooling. The conditions of various heat loads and various ambient temperatures are modelled and analysed. Calculations show that by making a model of the motor case, it is possible to obtain the best option for testing new and already created prototypes. Electric motors with permanent magnets are increasingly used in electric vehicles. The advantage of these engines is ease of maintenance, reliability, and significant efficiency. However, the output power can never be equal to the input power, because there is always a loss. More heat will inevitably be generated inside the engine with increasing power requirements [5, 6]. Most of the engines in production can no longer be maintained at a safe temperature level only by the natural convection cooling system [7], such as permanent magnet synchronous motors (PMSM) in drive systems [8, 9]. There is a contradiction between high heat generation and insufficient cooling capacity of the PMSM during operation time. Consequently, how to balance heat management requirements and the engine's limited ability to generate heat is an imperative problem that must be solved. There are various approaches to the implementation of engine cooling. For example, the simplest is self-cooling by natural convection with external ribs embedded in the housing, and the cooling effect can be enhanced by a fan mounted on one end of the shaft. There are other cooling systems such as liquid, but their main drawback is the presence of additional devices, which increases the drive mass and reduces reliability. Self-cooling or air-cooling is still the main thermal control method for the PMSM in the system drive. Therefore, it is relevant to develop a mathematical model for this type of engine.

Keywords*: electric transport, electric motors, mathematical model, heat control, diagnostics, testing.*

Вступ

Електродвигуни з постійними магнітами все частіше застосовуються на електротранспорті. Перевага даних двигунів – простота обслуговування, надійність і значний ККД.

Проте, вихідна потужність ніколи не може дорівнювати вхідній потужності, тому що завжди є втрати. Більша кількість тепла буде неминуче генеруватися усередині двигуна зі зростаючими затратами до вихідної потужності [1–5, 6]. Більшість двигунів на виробництві не можна підтримувати на безпечному рівні їх температури тільки природною конвекційною системою охолодження [7], наприклад, синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) в системах приводу [8, 9].

Існує протиріччя між великим виробленням тепла і недостатнім охолодженням PMSM під час роботи. Отже, необхідно збалансувати вимоги до теплового управління і обмежену здатність двигуна до виділення тепла, що є імперативною проблемою, яка повинна бути вирішена.

Експериментальна частина

Для нестаціонарної температури тривимірної моделі PMSM стаціонарне рівняння в похідних теплопровідності у декартових координатах можна виразити рівнянням (1).

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial T}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial T}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\varphi \qquad (1)$$

Граничні умови в розв’язанні рівняння (1) визначаються формулою (2), включаючи природну конвекцію теплообміну з повітрям, випромінювання теплообміну з навколишнім середовищем і теплопровідність між двома різними матеріалами на кордонах.

$$\left\{\begin{array}{c} -k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=h(T_г-T_0) \\ -k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=\varepsilon\sigma(T_г^4-T_0^4) \\ k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=k(\frac{\partial T}{\partial n}) \end{array}\right\} \qquad (2)$$

Еквівалентне інтегрування для диференціальних рівнянь (1) і (2) визначається формулою (3).

$$\int_{\Omega} u\left[pc\frac{\partial T}{\partial \tau}-\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\varphi\right]d\Omega+\int_{\Gamma} u_1\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+k_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z-q\right)+$$
$$+u_2\left[k_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+k_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z-h\left(T_0-T\right)\right]+u_3[k_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+ \tag{3}$$
$$+k_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+k_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z-\varepsilon\sigma\left(T_0^4-T^4\right)\Big]d\Gamma=0$$

де u, u_1, u_2 и u_3 – довільні функції. Нехай $u = u_1 = u_2 = u_3 = dT$ за допомогою методу Гальоркіна, з рівняння (3) слідує наступне рівняння:

$$\int_{\Omega}\delta T\left[pc\frac{\partial T}{\partial \tau}-\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\delta T\varphi\right]d\Omega$$
$$-\int_{\Gamma}\delta T[q+h\left(T_0-T\right)+\varepsilon\sigma\left(T_0^4-T^4\right)\Big]d\Gamma=0 \tag{4}$$

Коли метод кінцевих елементів прийнятий, вся модель PMSM розділена на безліч дрібних елементів, які складаються з декількох вузлів, ліній і поверхонь.

$$T\left(x,y,z,\tau\right)=\sum_{e}N_i(x,y,z)T_i(\tau) \tag{5}$$

Кінцеве рівняння поля температури зазвичай приймає форму

$$C\frac{dT}{d\tau}+KT=P, \tag{6}$$

де C – матриця теплоємності, K – матриця теплопровідності і P – температурне навантаження матриці; елементи матриць визначаються наступними рівняннями.

$$\begin{cases} K_y=\sum_{e}K_y^e+\sum_{e}H_y^e \\ C_y=\sum_{e}C_y^e \\ P_i=\sum_{e}P_{qi}^e+\sum_{e}P_{\psi i}^e+\sum_{e}P_{Hi}^e+\sum_{e}P_{Ri}^e \end{cases} \tag{7}$$

Всі перераховані параметри визначаються наступними інтерполяційними інтегралами в обсягах X або на поверхнях C кожного елемента:

$$\begin{cases} K_y^e=\int_{\Omega^e}\left(k_x\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+k_y\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}+k_z\frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial N_i}{\partial z}\right)d\Omega \\ H_{ij}^e=\int_{\Gamma^e}hN_iN_jd\Gamma \\ C_{ij}^e=\int_{\Omega^e}pcN_iN_jd\Omega \\ P_{\Psi_i}^e=\int_{\Omega^e}\Psi N_id\Omega \\ P_{q_i}^e=\int_{\Gamma^e}qN_id\Gamma \\ P_{H_i}^e=\int_{\Gamma^e}hT_0N_id\Gamma \\ P_{R_i}^e=\int_{\Gamma^e}\varepsilon\sigma(T^4-T_0^4)N_id\Gamma \end{cases} \tag{8}$$

Найвищу температуру на внутрішній стороні корпусу біля статора обрано в якості місця контролю для оцінки терморегулюючої здатності корпусу.

У головному циліндричному корпусі тепло, накопичене металом, може бути розраховане за формулою (9).

$$Q_{para} = \begin{cases} \int_{T_{init}}^{T} mc_{para} dT & T < T_{m1} \\ \int_{T_{init}}^{Tn1} mc_{para} dT + \int_{T_{m1}}^{T} \frac{L}{T_{m2} - T_{m1}} dT T_{m1} < T < T_{m2} \\ \int_{T_{init}}^{Tn1} mc_{para} dT + L + \int_{T_{m2}}^{T} mc_{para} dT & T > T_{m2} \end{cases} \quad (9)$$

Модель заміщення може бути визначена за формулою (10).

$$\eta = \begin{cases} 0 < T < T_{m1} \\ \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}} T_{m1} < T < T_{m2} \\ 1 < T < T_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{m \cdot L}{V_s \cdot \Psi \cdot \tau} \quad (11)$$

Середня теплоакумулююча здатність матеріалу заміщення під час процесу нагрівання показує співвідношення, визначене у формулі (11).

Висновки

У цій статті запропоновано метод контролю температури із застосуванням спеціального закритого кожуха двигуна, який описується математичною моделлю.

Робочий цикл двигуна є важливим фактором, що впливає на ефект терморегуляції корпусу на основі заміщення матеріалу. Тривалий час ефективне охолодження двигуна можна отримати як час переривання в кожному робочому циклі, що досить для повного вимірювання параметрів.

Література

1. Qi H.T., Fu Y.L., Qi X.Y., Lang Y. Architecture optimization of more electric aircraft actuation system, Chin. J. Aeronaut. 24 (2011), 506–513.
2. Cao W.P., Mecrow B.C., Atkinson G.J., Bennett J.W., Atkinson D.J. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA), IEEE Trans. Industr. Electron. 9 (59) (2012), 3523–3531.
3. Kang R.J., Jiao Z.X., Wang S.P., Chen L.S. Design and simulation of electrohydrostatic actuator with a built-in power regulator, Chin. J. Aeronaut. 22 (2009), 700–706.
4. Bennett J.W., Mecrow B.C., Jack A.G., Atkinson D.J. A prototype electrical actuator for aircraft flags, IEEE Trans. Ind. Appl. 46 (3) (2010), 915–921.
5. Morimoto S., Tong Y., Takeda Y., Hirasa T. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives, IEEE Trans. Ind. Appl. 14 (5) (1994), 511–517.
6. 6 Yamazaki K., Seto Y. Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition, IEEE Trans. Ind. Appl. 42 (4) (2006), 1045–1052.
7. Moir I., Seabridge A. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration, third ed., John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2008.
8. Guo H., Xu J.Q., Kuang X.L. A novel tolerant permanent magnet synchronous motor with improved optimal torque control for aerospace application, Chin. J. Aeronaut. 28 (2) (2015), 535–544.
9. Shi J.T., Zhu Z.Q. et al., Comparative study of synchronous machines having permanent magnet in stator, Electr. Pow. Syst. Res. 133 (2016), 304–312.
10. Farsane K., Desevaux P., Panday P.K. Experimental study of the cooling of a closed type electric motor, Appl. Therm. Eng. 20 (2000), 1321–1334.
11. Micallef C., Pickering S.J., Simmons K.A. et al., Improved cooling in the end region of a strip-wound totally enclosed fan-cooled induction electric machine, IEEE Trans. Industr. Electron. 55 (10) (2008), 3517–3524.
12. Pyrhonen J., Lindh P., Polikarpova M. et al. Heat-transfer improvements in an axial-flux permanent-magnet synchronous machine, Appl. Therm. Eng. 76 (2015), 245–251.
13. Kulkarni D.P., Rupertus G., Chen E. Experimental investigation of contact resistance for water cooled jacket for electric motors and generators, IEEE Trans. Energy Convers. 27 (1) (2012), 204–210.
14. Davin T., Pelle J., Harmand S., Yu R. Experimental study of oil cooling systems for electric motors, Appl. Therm. Eng. 75 (2015), 1–13.
15. Lim D.H., Kim S.C. Thermal performance of oil spray cooling system for in wheel motor in electric vehicles, Appl. Therm. Eng. 63 (2014), 577–587.

Рецензія/Peer review : 6.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д-р техн. наук, проф. Смирний М. Ф.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-178-183
УДК 621.311.62.19

М.О. ГРИЩУК, О.Є. РУБАНЕНКО, І.О. ГУНЬКО
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ФОТОВОЛЬТАІЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Представлені результати аналізу пошкодженого та нового досліджуваних трансформаторів свідчить про те умови експлуатації цих трансформаторів не порушувались. Запропоновані схеми, місця підключення приладів, методика досліджень а також прилади FRAnalyzer фірми Omicron, FLUKE 1736 та SATEC PM 175 дозволяють швидко та якісно визначати технічний стан СТ та показники якості електричної енергії. Аналіз виміряних АЧХ досліджуваного СТ свідчить про справний стан досліджуваного СТ, а саме тому, що відхилення отриманих АЧХ спостерігається у межах 2%, це свідчить про те, що СТ не має пошкоджень; на деяких характеристиках та на відповідних діапазонах частот, спостерігалось відхилення в межах 5%. Автори рекомендують, переглянути дату наступного планового технічного діагностування, та під час його проведення варто звернути увагу на стан його обмоток.

Ключові слова: діагностування; пошкодження; трансформатор; аплітудно-частотна характеристика; обмотка; магнітопровід, методика вимірювань.

M.A. HRYSHCHUK, A. E. RUBANENKO, I.A. HUNKO
Vinnitsa National Technical University

INVESTIGATION OF THE DAMAGE OF THE POWER TRANSFORMER AT THE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

Abstract – The depletion of explored reserves of fossil fuels leads to an increase in their value and compels humanity to seek new and alternative forms of energy. Rapid growth of photovoltaic, wind, small hydro power plants, etc. led to the redistribution of electricity flows along transmission lines through high-voltage power transformers, whose passport resource has already been exhausted. The risk of accidents and power shortages is increasing. Therefore, it is necessary to investigate the damage of high-voltage equipment of power plants using renewable energy to improve the known and to develop new methods and means of monitoring the technical condition of such equipment. Therefore, the analysis of damage to the power transformer at the photovoltaic power plant, tasks and research results are relevant. The presented results of the analysis of the damaged and newly investigated transformers indicate that the operating conditions of these transformers were not violated. The proposed circuits, connection points, research methodology, and FRAnalyzer devices from Omicron, FLUKE 1736 and SATEC PM 175 allow you to quickly and qualitatively determine the technical state of the electric power and the quality of electricity. The analysis of the measured frequency response of the investigated CT indicates the proper condition of the investigated CT, namely because: the deviation of the received frequency response is observed within 2%, it indicates that the CT is free of damage; on some characteristics and on the corresponding frequency ranges, deviations were observed within 5%.

Keywords: diagnosis; damage; transformer; frequency analysis; windings; planning.

Вступ

Використання відновлюваних джерел енергії на сьогодні є важливим та перспективним напрямком розвитку електроенергетичного комплексу України. В останні роки в Україні спостерігається зростання потужностей генерування електричних станцій, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, зокрема до таких станцій можна віднести фотовольтаічні електричні станції (ФЕС) [1]. Оскільки кількість енергії, що виробляється з відновлюваних джерел, зростає, то це впливає на параметри нормальних режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) та на якість електричної енергії [3]. Виробництво електроенергії електричними станціями, що використовують джерела відновлюваної енергії ставить нові завдання з безаварійної експлуатації високовольтнјuj обладнання. Оскільки робота таких об'єктів залежить від погодних умов, режим їх роботи носить динамічний характер. ФЕС на протязі доби змінює генеровану потужність, що впливає на параметри режиму роботи, призводить до частих перехідних процесів, які ускладнюють умови експлуатації високовольтного обладнання не лише ФЕС, а і розподільних електричних мереж.

Одним із важливих елементів таких об'єктів, як ФЕС та розподільні електричні мережі 10-35 кВ є, силові трансформатори (СТ) - це вартісні та відповідальні види високовольтного обладнання [1÷3]. Кожне несподіване відключення СТ пов'язане з неочікуваними фінансовими витратами не лише для електроенергетичного підприємства, а також і для споживачів електроенергії, які отримують електр оенергію, використовуючи цей трансформатор [4]. Та зважаючи на змінний в часі режим роботи ФЕС, ресурс силових трансформаторів зменшується швидше ніж у СТ, що експлуатуються в умовах стабільних навантажень [3].

Отже, важливим під час експлуатації ФЕС є моніторинг (огляди, вимірювання показників режиму та діагностичних параметрів і т.п.) з метою підтримання належного технічного стану СТ шляхом вчасних ремонтів, або шляхом корегування умов експлуатації. Для цього варто застосовувати релейний захист, використовувати сучасні методи та засоби діагностування СТ, такі як контроль тангенса кута діелектричних втрат ізоляції tgδ, визначення опору постійному струму, проведення експериментів короткого замикання та холостого ходу, хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторній оливі газів, тепловізійне обстеження, тощо [5]. Незважаючи на різноманіття методів та засобів діагностування СТ, мають місце пошкодження СТ при експлуата ції на ФЕС, хоча термін їх експлуатації на таких об'єктах електроенергет ичн ог о комплексу, відносно малий. Тому дослідження, результати яких наведені в статті є актуальними.

Метою досліджень є аналіз пошкодження силового трансформатора на фотовольтаічній електростанції

Задачі досліджень відповідно до мети наступні:

Аналіз об'єкту досліджень - силового трансформатора Писарівської ФЕС;

Аналіз особливостей вимірювального та діагностичного обладнання;

Розробка схеми приєднання вимірювального обладнання та алгоритму досліджень;

Аналіз виміряних АЧХ досліджуваного СТ.

Визначення поточного технічного стану СТ за результатами аналізу отриманих АЧХ.

Аналіз об'єкту досліджень

Як приклад, пропонується розглянути ФЕС «ПИСАРІВКА», що розташована в Хмельницькій області, Старокостянтинівського району (селище Писарівка). На ФЕС пошкодився СТ (рис.1) типу ТМГ 1000/10 У1 (рис. 3б). У трансформатора виявлено пошкодження обмоток. Вид пошкодження - сповзання та замкнення витків обмотки.

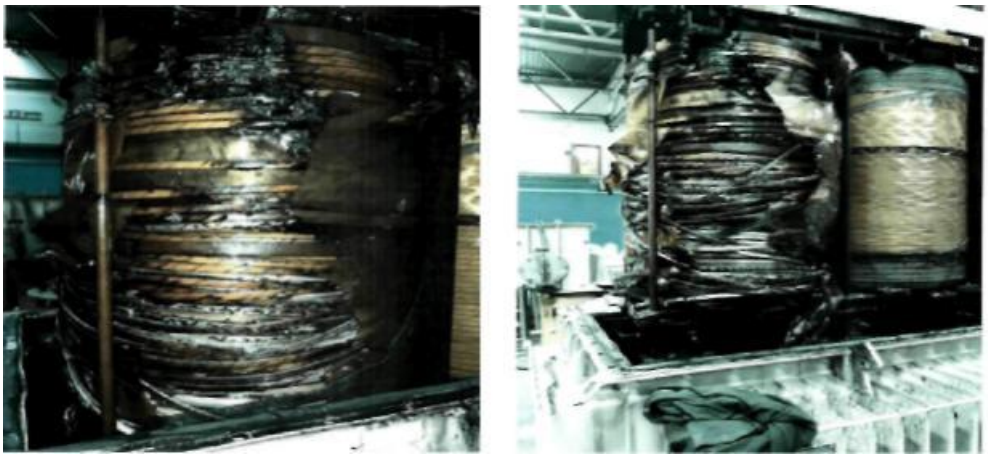


Рис. 1. Пошкодження СТ ТМГ 1000/10 У1

Враховуючи вартість такого обладнання, пропонується періодично контролювати технічний стан СТ, який експлуатується на ФЕС.

Правильний вибір діагностичної процедури та правильна інтерпретація результатів, отриманих при різних схемах вимірювань, покликані забезпечити більш надійну роботу не лише ФЕС, а і енергопостачальної компанії.

Відомо [1-6], що аналіз зміни напруги сигналу відгуку на тестовий сигнал, що прикладається до СТ приладом FRAnalizer фірми AMICRON вважається ефективним методом визначення технічного стану обмотки та магнітопроводу СТ. Тестовий сигнал автоматично змінювався приладом FRAnalizer. Така зміна частоти викликала зміну напруги сигналу відгуку. Цей метод дозволяє виявити деформації обмоток, пошкодження бандажу, пошкодження магнітопроводу та багато інших порушень. Як правило, як амплітудно-частотні, так і фазові частотні сигнатури отримуються за допомогою FRAnalizer. Метод визначення технічного стану СТ за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), це недорогий, точний та неруйнівний метод. Методика проведення такого аналізу не вимагає відкриття баку СТ. Враховуючи це, пропонується дослідити АЧХ СТ Писарівської ФЕС.

Методика досліджень стану СТ

Для проведення досліджень технічного стану нового СТ (розташованого на місці експлуатації пошкодженого) ФЕС «Писарівка» та з метою визначення можливих причин пошкодження СТ застосовувалось наступне вимірювальне та діагностичне обладнання: FRAnalyzer - для вимірювання параметрів АЧХ; FLUKE 1736 та SATEC PM 175 - для вимірювання показників якості електроенергії.

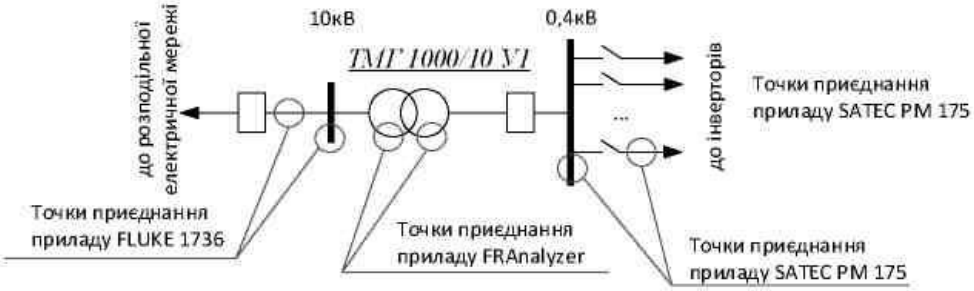


Рис. 2. Місця приєднання діагностуючого обладнання

Програма досліджень передбачала контроль показників якості електроенергії під час генерування ФЕС електричної енергії, а також контроль АЧХ СТ, що експлуатується на ФЕС.

Точки приєднання приладів контролю якості електроенергії FLUKE 1736 та SATEC PM 175 показані на рис. 2.

Результати вимірювань показників якості електричної енергії свідчать про те, що відхилень порушень вимог нормативних документів з якості електричної енергії виявлено **не було**. Розташування обладнання під час вимірювання показників якості електричної енергії показано на рис. 3.

а б в

Рис. 3. Розташування приладів FLUKE 1736 та SATEC PM 175 для одночасного контролю показників якості електричної енергії

Фото обладнання під час підключення та вимірювань АЧХ трансформатора показані на рис. 4.

а) б) в) г)

Рис. 4. Фото з місця проведення вимірювань АЧХ СТ

Параметри використовуваного приладу FRAnalyzer фірми Omicron та його технічні характеристики приведені в табл. 1 [7].

Таблиця 1

Технічні характеристики приладу FRAnalyzer

Діапазон частотного сигналу	10 Гц - 20 МГц
Шкала побудови графіку АЧХ	- логарифмічна; - лінійна; - обидві.
Операційна система	- Windows 7, 64 bit
Вхідний опір	- не менше 1 МОм
Джерело живлення	- від 100 до 240 В, 50 Гц
Похибка приладу	< 0.1 дБ (вище -50 дБ) та ±1 дБ (від -50 дБ до -80 дБ)

Для аналізу умов експлуатації та технічного стану досліджуваного СТ проведені наступні дослідження: у відповідності до наступної послідовності:

– візуальний огляд СТ;

– контроль параметрів ізоляції СТ, з допомогою омметра;

– контроль параметрів захисного заземлення;

– вимірювання АЧХ, для виключення випадкової похибки вимірювання за однією і тією ж схемою проводились декілька разів;

– порівняння отриманих результатів із попередньо отриманими типовими характеристиками;

– визначення технічного стану СТ шляхом аналізу отриманих АЧХ та порівняння їх з АЧХ інших, справних однотипних СТ.

Як видно, з табл. 1, такий прилад може забезпечити точні результати вимірювань, та дати адекватні результати для оцінки стану СТ. Під час вимірювань FRAnalizer розташовувався в автомобілі або на попередньо місці (рис. 4 а та рис. 4 в). Схема підключення приладу до досліджуваного трансформатора показана на рис. 5. Потрібно зауважити, що хоча метод дослідження стану СТ за допомогою вимірювання його АЧХ, дає точні результати та дозволяє визначити дефекти обмоток та магнітопроводу навіть на ранній стадії їх розвитку, алгоритм проведення таких вимірювань вимагає відключення СТ від мережі [7-9] , тому вимірювання проводились в час доби коли ФЕС не генерувала електричну енергію.

Коефіцієнт передачі тестового сигналу вимірюється в децибелах і є результатом ділення значення напруги відгуку на напругу тестового сигналу для поточного значення частоти. Передатна функція по напрузі $k_U(f)$ визначається за виразом (1)

$$k_U(f) = 20 \cdot \log_{10} [U_2(f) / U_1(f)], \text{ dB}. \quad (1)$$

Значення $kU(f)$ залежить від напруги вхідного тестового сигналу та напруги вихідного тестового сигналу. Спад напруги тестового сигналу залежить від фізичних властивостей досліджуваного силового обладнання (активний опір обмоток, індуктивний опір обмоток, ємність обмоток, та феромагнітні властивості силового трансформатора).

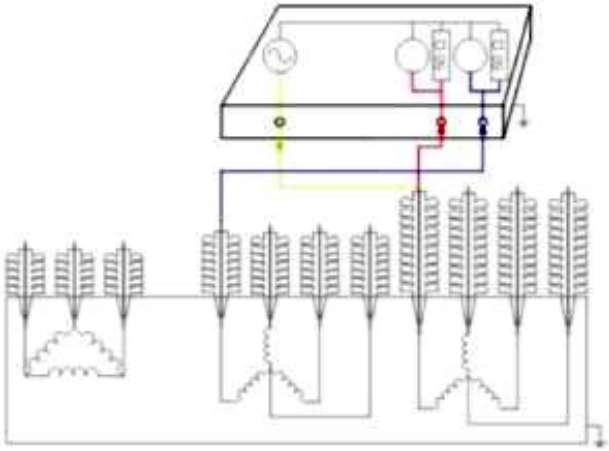


Рис. 5. Схема приєднання приладу FRAnalyzer до СТ

Вимірювання проводились за схемою підключення яка показана на рис. 5, враховуючи те що трансформатор трифазний і те, що вимірювання проводились за різними схемами підключення приладу FRAnalizer до СТ. Частина отриманих результатів показана на рис. 6.

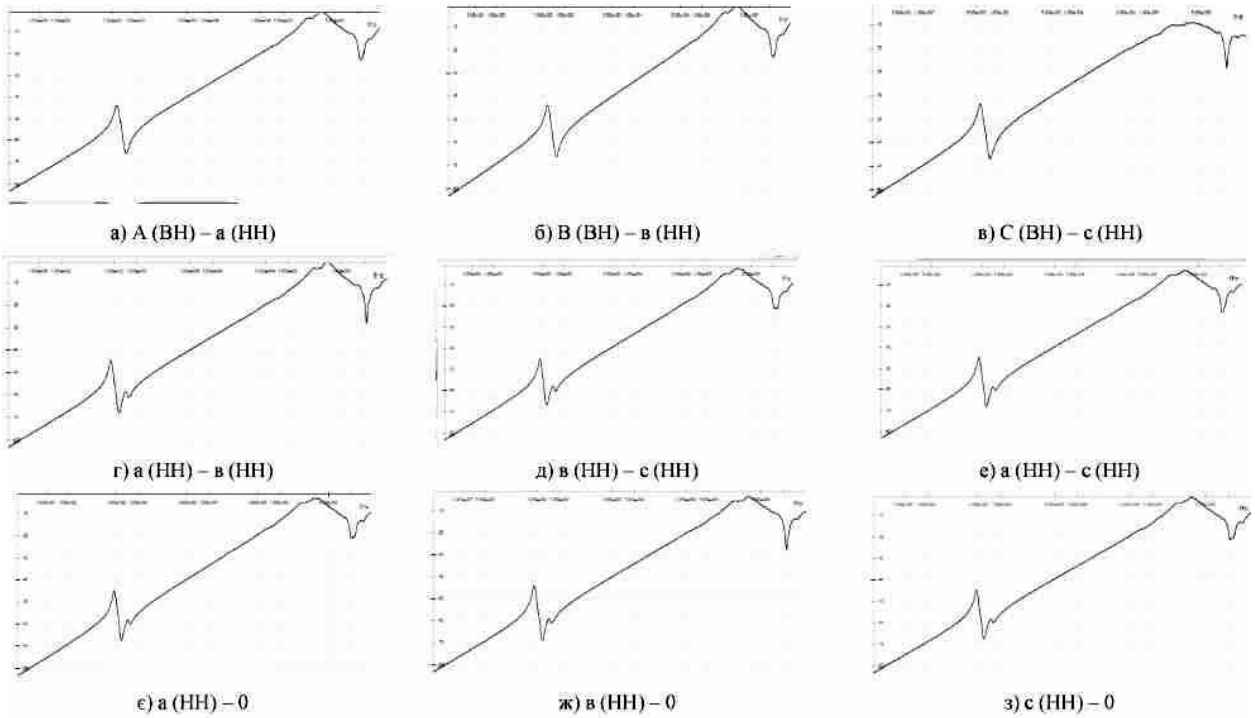


Рис. 6. Отримані АЧХ СТ

На рис. 5 зображено отримані АЧХ трансформатора, за різних схем підключення приладу до досл ідж ува ного СТ. Вим ірюв ання АЧХ ві дбува лось так: подава ли тестовий сигнал на обмотки СТ . Ча стота тестового сигналу автоматично змінювалась від 0 до 2 МГц. Спочатку тестовий сигнал подавався на обмотку високої напруги (ВН) фази А. Одночасно контролювалась напруга сигналу відгуку на виводі вторинної обмотки низької напруги (НН) фази а, рис. 5.а. За таким же принцип ом отримані інші АЧХ досліджуваного СТ , які показані на рис.5. Виміряні значення параметрів АЧХ за використані для побудови графіків залежності передатної функції трансформатора (за напругою) від частоти тестового сигналу допомогою програмного комплексу фірми Omicron.

Далі виконано порівняння отриманих АЧХ із попередньо виміряними для інших подібних досліджуваному трансформаторах. Отримані результати перевірки, у відповідності до [4-5], свідчать про відсутність пошкоджень обмотки та магнітопроводу СТ, оскільки відхилення, отриманої характеристики від попередньої, складає <2%. На нижньом у графіку зображено залежність амплітуди між вхідним та вихідним тестовим сигналом від частоти тестового сигнал у f/Гц. З даного графіку видно що фізичні параметри СТ, в межах норми, що свідчить про справний стан обмоток. Хоча, на деяких графіках на відповідних діапазонах частот, за [4] , спостерігалось відхилення в межах 5%. Як описано в [4-5], це свідчить про справний стан СТ, та варто зазначити, що ймовірно мають місце і мікро зрушення. Такі як, наприклад, зменшення натягу кріплення бандажу чи зміна ємнісного опору між витками СТ.

Для порівняння на рис. 7 а показана АЧХ трансформатора у якого пошкодження витків обмотки, а на рис. 7 б - сповзання витків [2].

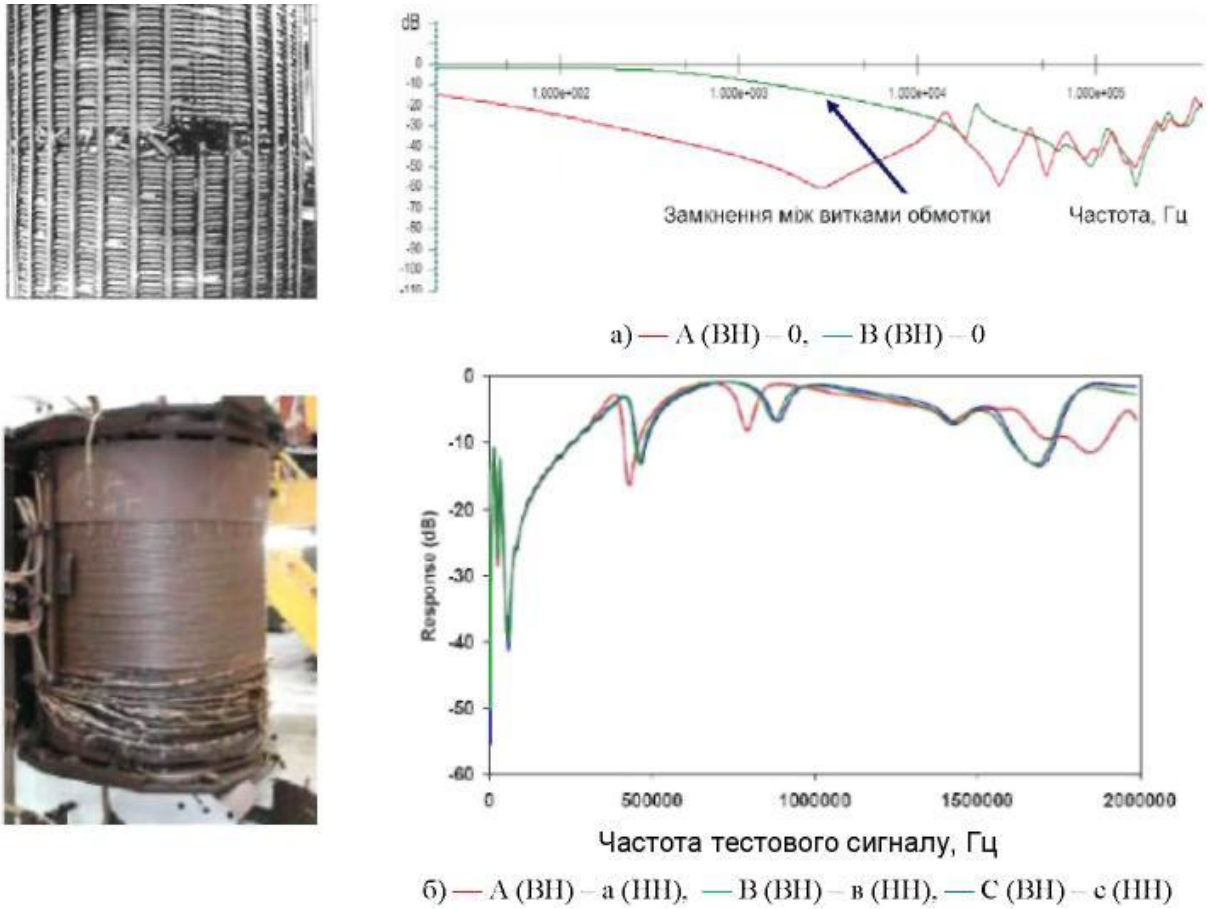


Рис. 7. АЧХ пошкоджених трансформаторів

Висновки

Аналіз пошкодженого та нового досліджуваних трансформаторів свідчить про те умови експлуатації цих трансформаторів не порушувались;

Прилади FRAnalyzer фірми Omicron, FLUKE 1736 та SATEC PM 175 дозволяють швидко та якісно визначати технічний стан СТ та показники якості електричної енергії;

Запропоновані схеми, місця підключення приладів, методика досліджень дозволяють визначати якість генерованої ФЕС електричної енергії та технічний стан СТ.

Аналіз виміряних АЧХ досліджуваного СТ свідчить про справний стан досліджуваного СТ, а саме тому, що:відхилення отриманих АЧХ спостерігається у межах 2%, це свідчить про те, що СТ не має пошкоджень; на деяких характеристиках та на відповідних діапазонах частот, спостерігалось відхилення в межах 5%.

Література

1. Лежнюк П.Д. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії: монографія / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 164 с. – *ISBN* 978-966-641-717-9.

2. Доля О. Е. Практический опыт использования метода FRA при измерении трансформаторного оборудования: презентация доклада / О. Е. Доля // Запорожье. - ПАО «Запорожтрансформатор». - Сервисный центр. - 36 с.

3. Vaišnys J. et al. Power transformer working regime analysis in photovoltaic power stations //2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2018. – С. 1-4.

4. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. – 2017.

5. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2017. – №. 186. – С. 103-106.

6. Nurmanova V. et al. A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-disk Faults //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019.

7. OMICRON, FRAnalyzer, ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE BARRIDO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA. Manual del usuario.

8. Zhao Z. et al. Diagnosing Transformer Winding Deformation Faults Based on the Analysis of Binary Image Obtained From FRA Signature //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 463-474.

9. Samimi M. H. et al. Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Т. 86. – С. 53-60.

References

1. Lezhnyuk P.D. Optimizacziya rezhimiv elektrichnikh merezh z vidnovlyuvanimi dzherelami elektroenergiyi: monografiya / P.D. Lezhnyuk, O.Ye. Rubanenko, Ґ.O. Gunko – Vinniczya: VNTU, 2017. – 164 s. – ISBN 978-966-641-717-9.

2. Dolya O. E. Prakticheskij opyt ispolzovaniya metoda FRA pri izmerenii transformatornogo oborudovaniya: prezentacziya doklada / O. E. Dolya // Zaporozhe. - PAO «Zaporozhtransformator». - Servisnyj czentr.-36 s.

3. Vaisnys J. et al. Power transformer working regime analysis in photovoltaic power stations //2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2018. – S. 1-4.

4. Rubanenko O. Ye., Labzun M. P., Grishhuk M. O. Viznachennya defektiv transformatornogo obladnannya z vikoristannyam chastotnikh diagnostichnikh parametriv. – 2017.

5. Rubanenko O. Ye., Labzun M. P., Grishhuk M. O. Obg`runtuvannya mozhlivosti viyavlennya defektiv deformacziyi obmotok silovogo transformatora za rezultatami vimiryuvan` FRA //Visnik Kharkivskogo naczionalnogo tekhnichnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – 2017. – № 186. – S. 103-106.

6. Nurmanova V. et al. A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-disk Faults //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019.

7. OMICRON, FRAnalyzer, ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE BARRIDO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA. Manual del usuario.

8. Zhao Z. et al. Diagnosing Transformer Winding Deformation Faults Based on the Analysis of Binary Image Obtained From FRA Signature //IEEE Access. – 2019. – T. 7. – S. 463-474.

9. Samimi M. H. et al. Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – T. 86. – S. 53-60.

Рецензія/Peer review : 20.12.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Кутін В. М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-184-191
УДК 504.064

А.В. КОВАЛЬ, А.Г. ТКАЧУК, М.С. ГРИНЕВИЧ
Державний університет «Житомирська політехніка»
Т.Л. КОВАЛЬ
Житомирський національний агроекологічний університет

МОБІЛЬНА БЕЗДРОТОВА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

У роботі розглянуто реалізацію одного зі способів моніторингу та аналізу якості повітря з використанням безпілотного літального апарата. В результаті аналізу отриманих експериментальних даних було обрано основу для даної системи та проведено ряд досліджень.

Ключові слова: БПЛА, якість повітря, система моніторингу, мобільна система.

A.V. KOVAL, A.H. TKACHUK, M.S. HRYNEVYCH
State University «Zhytomyr Polytechnic»
T.L. KOVAL
Zhytomyr National Agroecological University

MOBILE WIRELESS SYSTEM FOR AIR QUALITY ANALYSIS

The purpose of this work is to develop an automated system for air quality monitoring and analysis based on the mini unmanned aerial vehicle. An automated mobile wireless air quality monitoring system has been developed as an alternative way of finding contaminants to replace ground based systems. It provides more flexible use than terrestrial systems. The main task is to improve and create an alternative system that will perform the same tasks as terrestrial systems, but will be faster and able to work in inaccessible places. The system collects pollution data and searches for gas leaks in various potentially hazardous locations. This system is compact, lightweight, capable of being mounted on any unmanned aerial vehicle, capable of operating in the absence of GPS signal and capable of rapid deployment and piloting by operator or offline without endangering human life. This project is a system based on a conventional commercial unmanned aerial vehicle of any model, equipped with a gas concentration sensor and controlled by the Robot Operating System (ROS). In the course of this project all problems related to stability of measurement data were solved. The system is now capable of providing consistently high quality measurement. Some measurement experiments are needed to study the relationship between the distance from a gas source to the measurement system and the measured gas concentration. The influence of UAV parameters, such as battery level, on the measurement values is investigated.

Keywords: UAV, air quality, monitoring system, mobile system.

Вступ

В умовах сьогодення людство намагається зробити своє життя максимально простим і безпечним, тож питання безпеки є досить актуальним. Саме тому відбувається розробка різноманітних засобів та пристроїв які можуть замінити людину в умовах що є небезпечними для здоров’я або життя. Наприклад, існує багато роботів і безпілотних літальних апаратів (БПЛА) які знаходять безліч можливостей для застосування. На сьогоднішній день БПЛА широко використовуються людьми для створення фотографій з висоти, доставки їжі, а також у різних військових цілях [1]. Завдяки своїм властивостям та чудовій прохідності БПЛА можливо використовувати для вимірювання якості повітря на певний території, або для перевірки на наявність шкідливих або вибухонебезпечних газів. Саме цей спосіб застосування описано в даній статті.

Цей метод має ряд переваг, оскільки БПЛА здатні переміщуватись з досить великою швидкістю, а отже здатні дослідити набагато більшу територію, ніж здатна зробити це людина за той самий проміжок часу. Також цей спосіб виявлення витоку газу є значно дешевшим, оскільки зникає необхідність оплачувати людську працю.

Звісно, щоб виконувати поставлені задачі, БПЛА повинен відповідати ряду критеріїв. Дана система повинна бути легкою, компактною, працювати в середовищах, де неможливо використовувати GPS [2]. Крім того, є необхідними й такі функції, як робота в умовах слабкого GPS сигналу, або повної його відсутності (поблизу мостів та поблизу будівель). Також система повинна бути простою для використання та мати зв’язок з оператором з мінімальним ризиком для його здоров'я або працювати в автоматичному режимі.

Експериментальна частина

ОГЛЯД ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ ПРОЕКТУ. БПЛА AR. Drone Parrot v2. AR.Drone Parrot v2, як і його попередник, підтримує внесення деяких поліпшень, які можуть бути корисними для подальших досліджень. І, крім того, його вдосконалили його розробники. Зокрема встановлено нову фронтальну камеру з роздільною здатністю HD 720p і датчиком тиску. На додаток до цього, він отримав багато інших поліпшень, які здавалися незначними, на перший погляд, але при ближчому огляді вони є доволі корисними. Деякі поліпшення програмної складової і датчик тиску збільшують стабільність польоту і здатність протидії зовнішнім впливам у випадку сильного вітру. Краща камера позитивно вплинула на стабільність і точність автоматичного польоту. Потрібно відзначити наявність порту USB 2.0. Це дозволяє підключати додаткові пристрої USB без виконання апаратної модифікації основної плати.

ROS та інші програмні компоненти. *Robot Operating System (ROS)* є потужним програмним забезпеченням для керування роботами.

В даний час він активно використовується в численних дослідницьких проектах, оскільки це модульна система з відкритим кодом, яка підтримує різні мови програмування та надає потужні інструменти візуалізації [3].

Опис основних пакетів ROS: Ardrone_autonomy – пакет був створений для забезпечення зв'язку між дроном і комп'ютером з попередньо налаштованим ROS середовищем. Це дозволяє отримувати всі дані з датчиків БПЛА та надсилати команди керування від базової станції з ROS до БПЛА [4].

Tum_ardrone пакунок забезпечує можливість автономної навігації в попередньо невідомому середовищі за умов відсутності сигналу GPS орієнтуючись відповідно до зображення з бортових камер БПЛА. Також зберігається можливість ручного керування БПЛА, якщо це необхідно [5].

Пакунок калібрування камери – це спеціальний компонент ROS, який дозволяє відносно просто та швидко калібрувати монокулярні або стереокамери за допомогою спеціального зображення [6].

Пакет Ethzasl ptam використовується для калібрування камери для наступного використання PTAM [7].

РЕАЛІЗАЦІЯ. Модуль вимірювання рівня забруднення. Arduino Yún mini (рис. 1) – це розробницька плата, побудована на базі об'єднання мікроконтролеру ATmega32u4 та мікропроцесору Atheros AR9331. Atheros мікропроцесор зробив можливим запуск Linux дистрибутиву OpenWrt, що називається Linino OS. Дана розробницька плата оснащена мережевими інтерфейсами Ethernet та Wi-Fi, USB-A портом, micro-SD картковим слотом, 20 цифровими входами та виходами (7 з яких мають підтримку ШИМ і 12 можуть бути задіяні як аналогові входи), 16 MHz кварцовим резонатором, micro USB роз'ємом, підтримкою ICSP [8].

Основною причиною використання саме цієї плати є можливість забезпечення мережевого підключення через Wi-Fi. Для цієї плати було написано спеціальне програмне забезпечення для підтримки протоколу передачі даних TCP/IP. Підтримка клієнта TCP/IP дозволяє підключатися до віддалених хостів або апаратних засобів для читання і запису даних. У поточному проекті TCP/IP протокол використовується для передачі даних підключених датчиків до інших (наземних) компонентів системи.

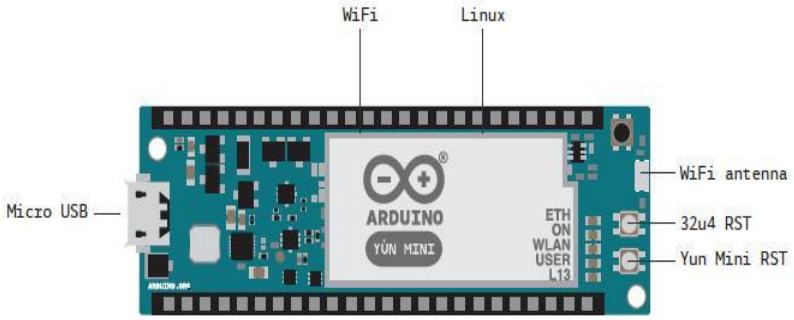


Рис. 1. Arduino Yun mini [8]

Датчик температури та вологості. Датчик SHT10 (рис. 2) об'єднує чутливий елемент і схему обробки сигналів на міні-друкованій платі і забезпечує стабільний цифровий сигнал на виході. Датчик включає компоненти, чутливі до вологості і до зміни температури, також вони знаходяться на одному чипі, з 14 бітним ЦАП перетворювачем і схемою послідовного інтерфейсу для реалізації безшовного з'єднання. Таким чином, цей датчик має відмінну якість, швидку реакцію, достатню здатність протидії завадам, високу ефективність. Він використовує двопровідний інтерфейс зв'язку (I2C) і дозволяє легко інтегруватися в хост-систему [9]. Цей датчик використовувався для тестування програми побудови карти витоку газу замість газового датчика. Оскільки тести з газом потребують особливих умов і є доволі небезпечними, тестування програмних компонентів виконувалося без газу.

Рис. 2. SHT10 датчик

Рис. 3 демонструє AR.Drone v2 з встановленими Arduino Yun mini та SHT10 датчиком.

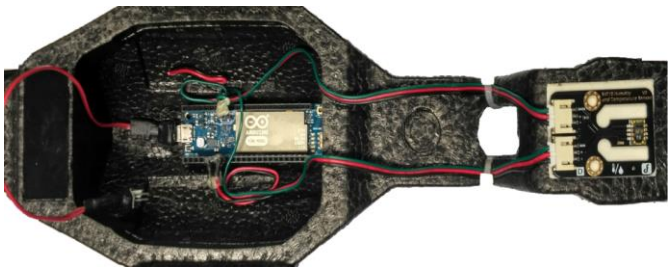


Рис. 3. Arduino Yun та SHT 10 встановлені на шасі AR. Drone Parrot v2

ROS робоче оточення та додаткові ROS пакунки. Можливість перегляду інформації про виміри рівня газу в ROS забезпечується власно розробленим пакетом в ROS. Цей пакет ROS включає в себе два ROS сервіси. Одна з цих служб використовується як видавець, а інший, як підписник (ця інформація більш докладно описана в ROS wiki [10]). ROS містить багато вузлів, і майже всі функціональні можливості забезпечуються вузлами, до того ж вузол – це загальне ім'я якоїсь структури, яку можна використовувати для різних завдань, і ці вузли з'єднані один до одного для реалізації заздалегідь визначених функціональних можливостей. Для отримання деякої інформації ззовні в ROS потрібно створити повідомлення (детально [10]) і використовувати невелику програму, яка називається видавцем. Найважливішим функціоналом видавця є отримання деякої інформації ззовні та надання такої інформації доступним для інших вузлів ROS.

Вимірювальна плата, яка вбудовується в AR.Drone v2 - Arduino Yun, має власний модуль Wi-Fi, тому він підключається безпосередньо до ПК наземної станції. AR.Drone v2 підключений до того ж комп'ютера через Wi-Fi. Для підключення AR.Drone Parrot v2 і Arduino Yun до того ж Wi-Fi хоста спеціальний скрипт був попередньо встановлений на головну плату AR.Drone, що дозволило підключати AR.Drone до існуючої точки доступу Wi-Fi замість створення власної Wi-Fi точки доступу, як це відбувалося за замовчуванням.

Таким чином вимірювальна система стала цілком незалежною від типу платформи носія, оскільки не має жодних апаратних зв’язків з останнім (рис. 4).

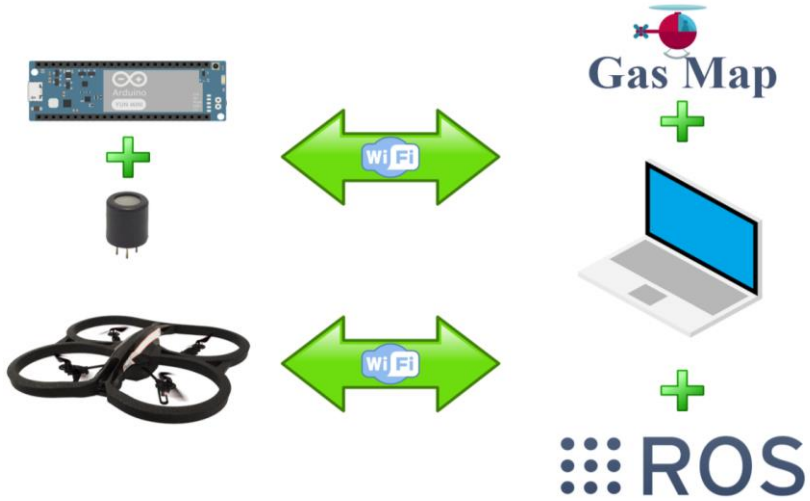


Рис. 4. Схема встановлення зв’язку між AR.Drone v2 та наземною станцією

Власноруч створений пакет ROS включає в себе абонента і слухача (відповідно до структури фреймворку). Ці два компоненти необхідні для інтеграції та надання доступу до даних вимірювань в ROS середовищі. Раніше в цьому розділі було описано, як саме працюють ці компоненти. Тепер цей робочий простір можна використовувати як в режимі моделювання так і в режимі реального часу. Для моделювання траєкторії польоту необхідним є режим моделювання. Наприклад, якщо вперше необхідно зробити деякі вимірювання на місці з попередньо невідомим середовищем, можна створити та використати недеталізовану модель місця польоту. Це дозволяє перевірити траєкторію польоту на предмет можливих колізій, оскільки вони можуть вивести з ладу БПЛА з вимірювальною системою на тривалий час, поточний стан проекту не включає розробку системи запобігання зіткнень. Відповідно до зазначених факторів потребується ретельна підготовки перед польотом, особливо в місцях з попередньо невідомим оточенням. Цей режим не потребує фізичної наявності БПЛА, оскільки являє собою лише віртуальне моделювання польоту БПЛА. Крім того симуляція допоможе створити маршрут польоту для дослідження:

Етапи підготовки до реального польоту:

– запуск tum_simulator ROS пакунку (рис. 5) [11];

– запуск tum_ardrone ROS пакунку і перемикання до ручного режиму керування;

– після цього пролетіти за певним маршрутом з увімкненим записом даних одометрії (політ відбувається в замкнутій симуляції – рис. 5);

– після виконання попередніх пунктів можливо перезапустити симуляцію і відтворити раніше записані дані одометрії, і відповідно до цього може бути створений та відкоригований план автоматичного польоту для відпрацювання пакетом tum_ardrone;

– gотім імітуйте політ зі створеним планом польоту і у випадку, якщо отримані результати задовольняють поставлені задачі, то наступним кроком повинен стати справжній політ.

Режим справжнього польоту. Для цього режиму не потрібно використовувати пакет моделювання, а потрібно запустити спеціальний пакет – test1, він включає служби видавця. Після запуску служби видавця можна запустити утиліту rqt_plot ROS і зберегти дані вимірювання газу (якщо це необхідно). Абонент з пакунку test1 може бути використаний в рамках інших служб для отримання вимір рівня концентрації з датчику газу, встановленому на квадрокоптері, в режимі реального часу. Цей режим має два підрежими: перший – реального часу, а другий – автономний.

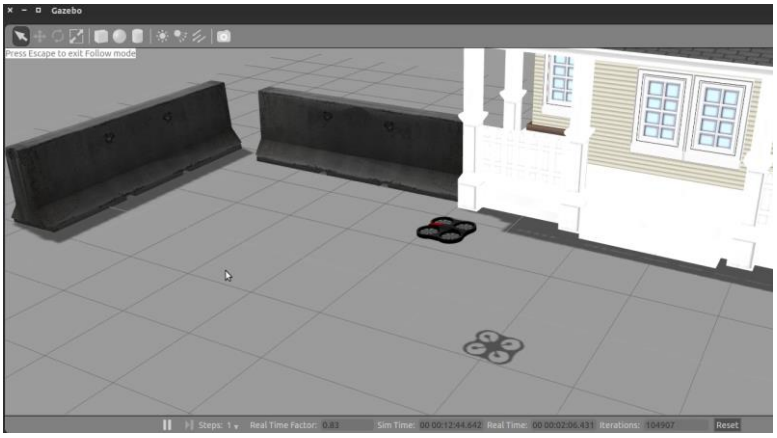


Рис. 5. Головне вікно tum_simulator ROS пакету

Запис льотної інформації. У процесі створення газової карти можна записати дані польотної інформації та вимірювання газу. AR.Drone v2 записує дані наступним способом: програмний додаток для газової мапи має можливість зберегти всі важливі дані в спеціальному файлі GeoJSON [12]. Геометричний масив включає x, y, z декартові координати AR.Drone Parrot v2. Також до масиву координат включено географічну довготу і широту (це необхідно для візуалізації газових точок на мапі). Marker_color у масиві властивостей містить 4 числа у форматі шістнадцяткового об'єднання, по 2 символи на число (для прикладу: ff або 8A), в одному рядку, і це описує колір RGBA, який формується відповідно до значень вимірювань підключених датчиків.

Для запису даних польоту використовувалася команда, подібна до цієї:

rosbag record -O ~/bagfiles/flight1.bag /ardrone/odometry /ardrone/image_raw, де rosbag – назва пакета ROS для запису і відтворення попередньо записаних даних;

record – перший параметр для цієї команди, це означає, що тепер інформація записується;

аргумент -O наказує rosbag записувати журнал у файл з ім'ям flight1.bag, з розташуванням у каталозі ~/ bagfile, а службові аргументи дають команду на запис rsbag тільки підписки на ці дві теми (/ardrone/odometry та /ardrone/image_raw);

/ardrone/odometry – ROS служба що містить дані одометрії;

/ardrone/image_raw – містить відео з камер AR.Drone Parrot.

Запуск цієї команди виконує конвертацію flight1.bag до вигляду звичайного .txt файлу логів з одометричною інформацією:

rostopic echo -b ~/bagfiles/flight1.bag -p /ardrone/odometry > data.txt

Звичайно, ця команда може бути модифікована для виокремлення відео з flight1.bag і його послідуючого перетворення в формат звичайного відеофайлу.

Після отримання файлу .bag і файлу даних газу, а також перетворення файлу .bag в файл odometry.txt можна побудувати карту газу.

Побудова мапи газу. Загальна схема зв'язку між дроном і наземною станцією описується на рис. 6. Плата Arduino підключається до термодатчика датчика, у зв’язку з неможливістю проведення повноцінних льотних випробувань поблизу місця значного витоку газу датчик вимірювання концентрації газу було замінено на термодатчик, і розміщується на борту AR.Drone Parrot v2 (у випадку використання попередньої платформи HW AR.Drone v1 підключається до газового датчика).

Загалом управління AR.Drone здійснюється через 3 основні служби зв'язку. Управління та налаштування дрону здійснюється шляхом відправлення команд AT на UDP-порт 5556. Інформація про безпілотник (наприклад, його статус, його положення, швидкість, швидкість обертання двигунів тощо), що називається navdata, надсилається дроном своєму клієнту на порт UDP 5554. Відеопотік відправляється AR.Drone на клієнтський пристрій на порт 5555 (UDP використовується для AR.Drone 1.0, TCP для AR.Drone 2.0). Четвертий канал зв'язку, що називається керуючим портом, може бути встановлений на TCP-порту 5559 для передачі критичних даних [13].

Arduino Yun створює власне TCP-з'єднання на порту 255. Наземний комп'ютер створює точку доступу Wi-Fi. Arduino Yun і AR.Drone v2 підключаються до цієї точки доступу Wi-Fi (рис. 4).

Для побудови карти газу використовується спеціальна програма (джерельний код цієї програми доступний у відкритому репозиторії github [14]).

На рис. 6 зображено діаграму програмної реалізації. На цій діаграмі є два сірі блоки. Сірі блоки – це зовнішні компоненти. Блок Files включає 2 файли: Geo File – вміст даного файлу, відправляється до Google Maps API, що дозволяє відобразити поточну позицію квадрокоптеру на Google Maps, Json File – це файл для збереження інформації про поточний стан вимірювань. Створення файлу Json записує поточний політ для подальшого відтворення в автономному режимі. Іншим сірим блоком є вхідні компоненти (Input Components). Вхідними компонентами є Arduino (підключена за допомогою TCP) і ROS (вузли, які надають інформацію про поточне положення квадрокоптера і поточні часові мітки даних).

Поруч із сірими блоками розташовані три кольорові блоки. Ці блоки є реалізацією шаблону програмування MVC. Згідно з цим шаблоном програма повинна складатися з моделей (Models), відображення (Views) і контролерів (Controllers).

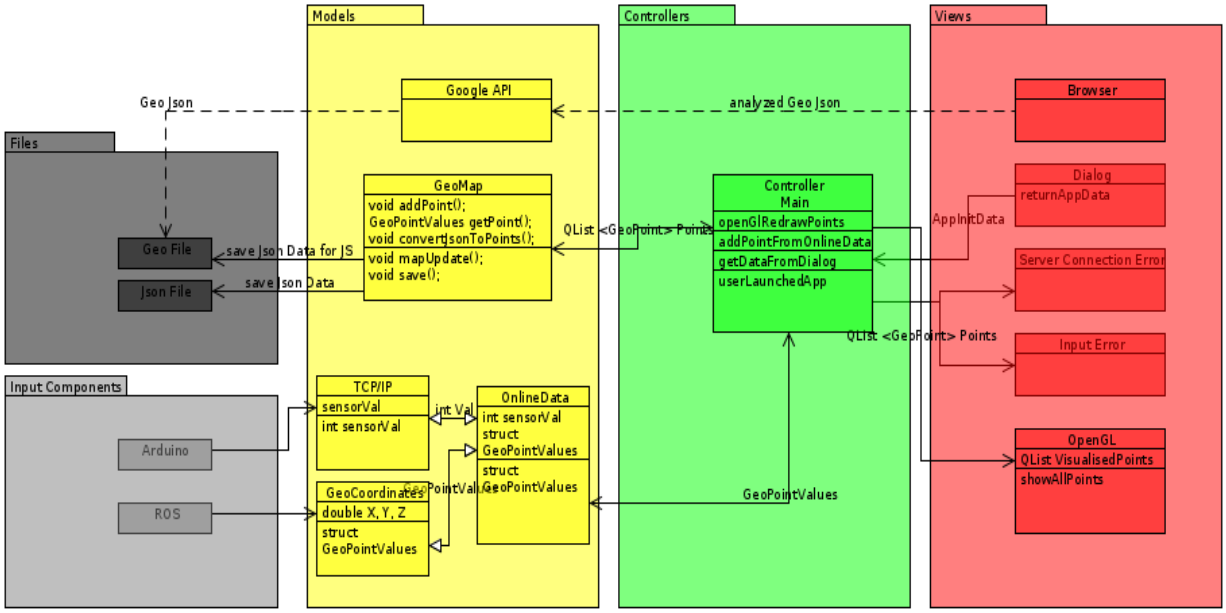


Рис. 6. Діаграма програмної реалізації

Всі класи, що належать до моделі, працюють з даними програми. Клас Google Map включає в себе всі методи, які відповідають за збереження даних про точки вимірювання і операції збереження даних координат польоту в Json File і відновлення хмари точок з цього файлу в разі запуску програми в автономному режимі. Online data – обгортка для класів TCP/IP і GeoCoordinates. Клас TCP/IP відповідно до свого імені відповідає за з'єднання по TCP/IP протоколу між платою Arduino Yun та програмою побудови мапи газу, встановленою на ПК наземної станції. Це необхідно для отримання даних датчиків, які підключені до Arduino Yun. Клас GeoCoordinates отримує дані одометрії від ROS і здійснює певні трансформації цих даних (наприклад, перетворення координат декартових в координати географічного розташування). Google API буде описуватися самостійно в складі компонента Browser (View).

Класи відображення (View) надають можливість візуалізувати інформацію представлену в моделі для користувача і вони необхідні для зв'язку між користувальницьким інтерфейсом і моделлю (рис. 7, рис 8). Найбільш важливим з цих класів є клас OpenGL. Клас OpenGL створює Open GL [15] вікно, що візуалізує хмару точок газових вимірів. Клас Dialog надає можливість встановлення параметрів ініціалізації, як онлайн/офлайн режим, мінімальне/максимальне значення датчика (програмний діапазон чутливості підключеного датчика), початкове місце знаходження дрону (поточна система не має GPS-модуля, тому гео-координати – це декартові координати, перетворені в географічні координати) або ім'я файлу без згаданих раніше параметрів у випадку автономного режиму. Помилка підключення до сервера (Server Connection Error) – це вікно з помилкою, яке з'являється у випадку вибору онлайн-режиму без можливості підключення до платформи AR.Drone Parrot. Помилка вводу (Input Error) буде показано у випадку помилкових даних у будь-якому полі вікна форми діалогу.

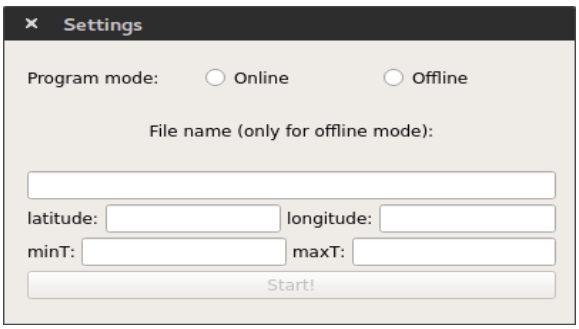


Рис. 7. Вікно початкової конфігурації програми

Головний контролер (Main Controller) – це компонент, що забезпечує можливість зв'язку між частинами моделі та відображення.

Google API + Browser відповідають за функціональність карт Google (вона показує точки вимірювання газу на картах Google). Насправді можна інтегрувати браузер в головний додаток як інше вікно QT, але використання незалежного браузера (для запуску JS скрипту) краще, тому що він може працювати на іншому (інших) ПК для відслідковування поточного розташування БПЛА. Більш того, з міркувань безпечної розробки програмного забезпечення краще зробити його відокремленим (рис. 9).

Використання MVC паттерну програмування дає можливість легкого масштабування програмного продукту і можливість додавання додаткових функцій без необхідності внесення зміни в раніше написаний код.

В основному дане програмне забезпечення, написане на мові програмування C ++ з використанням QT5 фреймворку, але також включає скрипти запуску bash, скрипт python в частині ROS і скрипт JavaScript для використання API Google Maps (Google не надає C++ API, вони пропонують лише JS API).

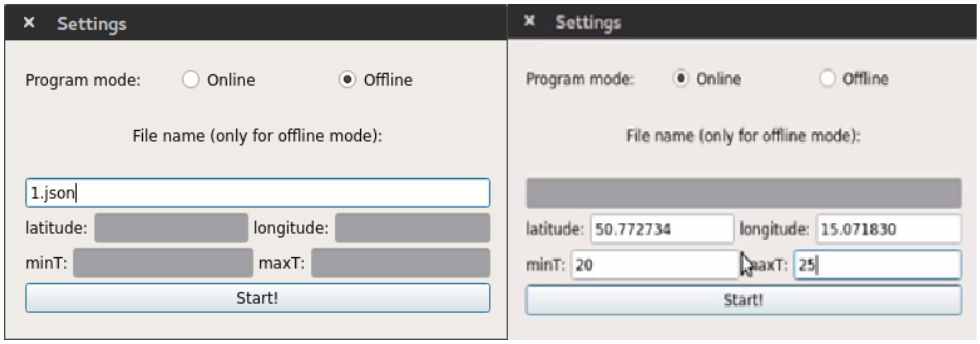


Рис. 8. Вікно початкової конфігурації програми в автономному та режимі реального часу

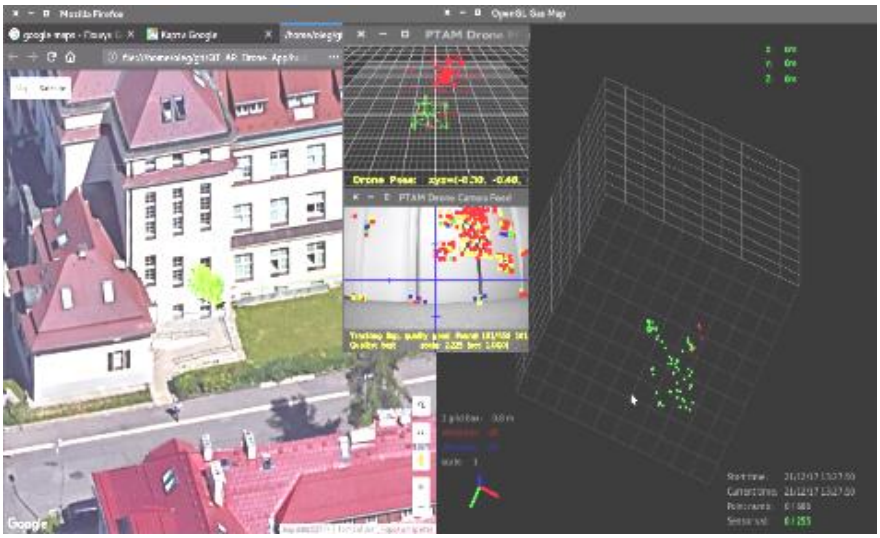


Рис. 9. Головне вікно розробленої програми для побудови «карти газу» (праворуч), браузер з запущеним JS скриптом, який відображає маршрут проведення вимірів на місцевості (ліворуч), Drone Camera та Drone PTAM вікна з tum_ardrone ROS пакунку (всередині)

Програма зображує газові хмари в 3D-просторі. Вона надає можливість обертати попередньо побудовану 3D-сцену, щоб обрати кращу позицію для перегляду газової хмари, для обертання навколо осі потрібно натиснути ліву клавішу мишки і перемістити стрілку на екрані це дозволить змінювати напрямок огляду навколо осі X та Z. Перш ніж використовувати цю програму, потрібно налаштувати такі постійні значення, як масштаб карти початкові координати точки запуску (в проекті не використовується GPS тому географічні координати отримуються математичним шляхом). Щоб переглянути дані однієї з візуалізованих точок, необхідно натискати клавіші "+" або "-" на клавіатурі доти поки не буде обрана потрібна точка на екрані. Також є рядок стану, який візуалізує кількість точок у відсотках. Рівень газу описується кольором точки. Він змінюється від зеленого до червоного з жовтим у середині відповідно до кількості газу в певний момент часу в діапазоні вимірювань.

Якщо програма використовується в режимі реального часу допоміжні компоненти будуть запущені автоматичним скриптом. Основною відмінністю між програмами є інший алгоритм отримання даних. В режимі реального часу програма повинна підключитися через wi-fi до квадрокоптера. У режимі offline програма відновить одну з попередніх сесій, що була автоматично збережена під час одного з раніше проведених експериментів.

Стабільність роботи в режимі реального часу забезпечується перевіркою якості даних газу та урахуванням лише реальних даних, також використання протоколу TCP/IP гарантує відповідність отриманих даних реальним вимірам навіть у місцях з низьким рівнем сигналу WiFi.

Алгоритмічне забезпечення. На рис. 10 представлено основний алгоритм автоматизованої мобільного бездротової системи моніторингу якості повітря.

Результати дослідження

Випробування програми побудови мапи газу. Як вже згадувалося раніше, було використано датчик SHT10 для тестування програми побудови мапи газу замість датчика концентрації газу. Тести з газом потребують особливих умов, тому тестування програмних компонентів виконувалося в умовах відсутності додаткового газу. Рис. 11 демонструє умови проведення експерименту. Нагрівач (чорний ящик під AR.Drone Parrot) створює спрямований тепловий потік. Безпровідна вимірювальна система на базі AR.Drone Parrot v2 виконує політ відповідно до попередньо визначеного маршруту і проводить вимірювання температури під час цього польоту.

Результати цього тесту показані на рис. 12.

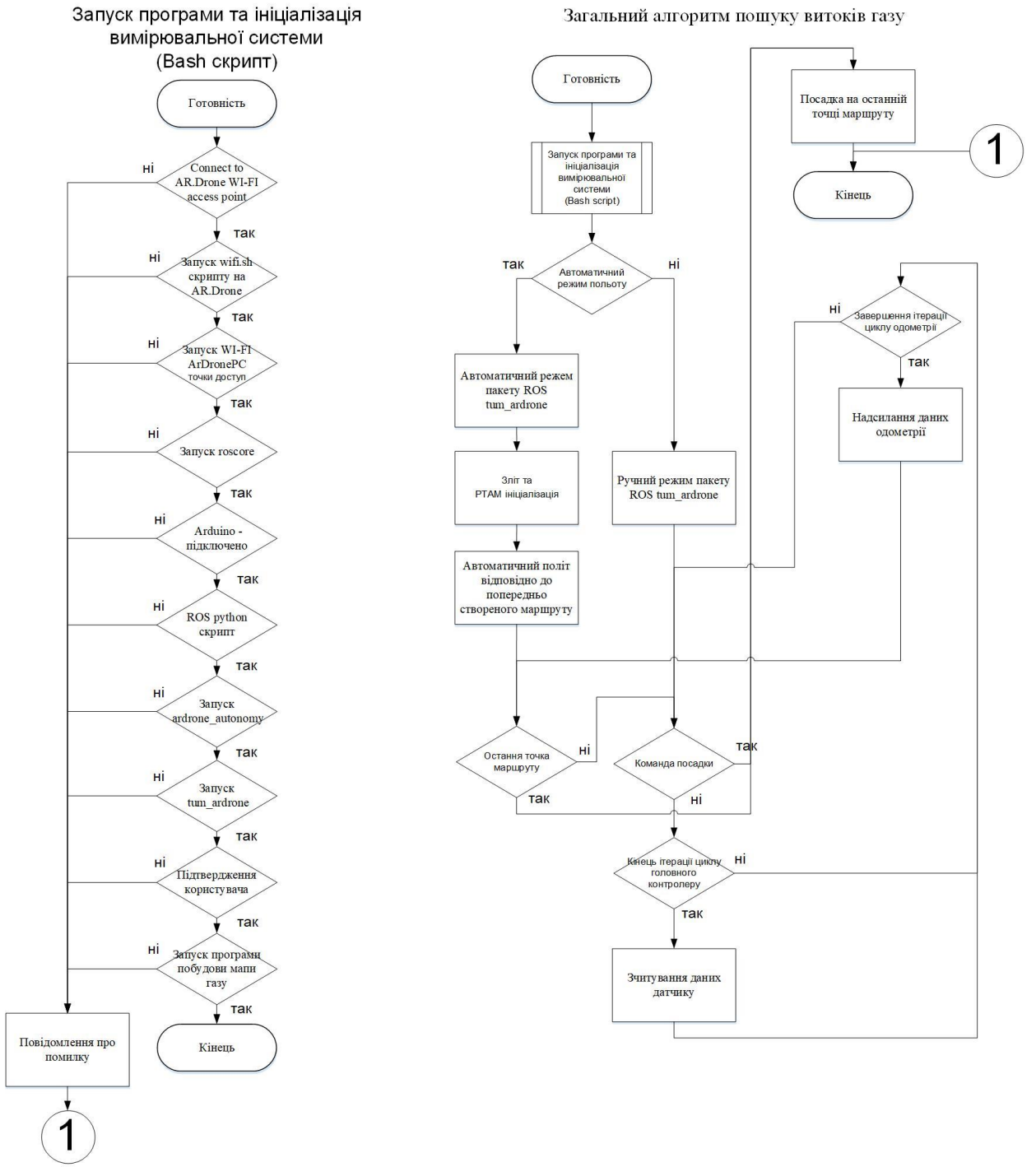


Рис. 10. Основний алгоритм автоматизованої мобільного бездротової системи моніторингу

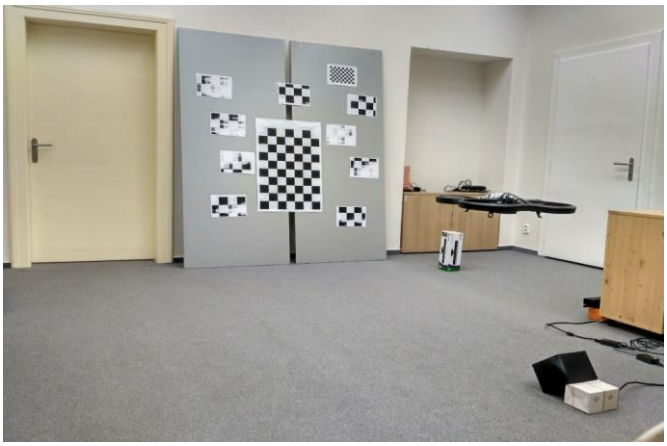


Рис. 11. Тестова сцена під час процесу абстрактного виявлення газу

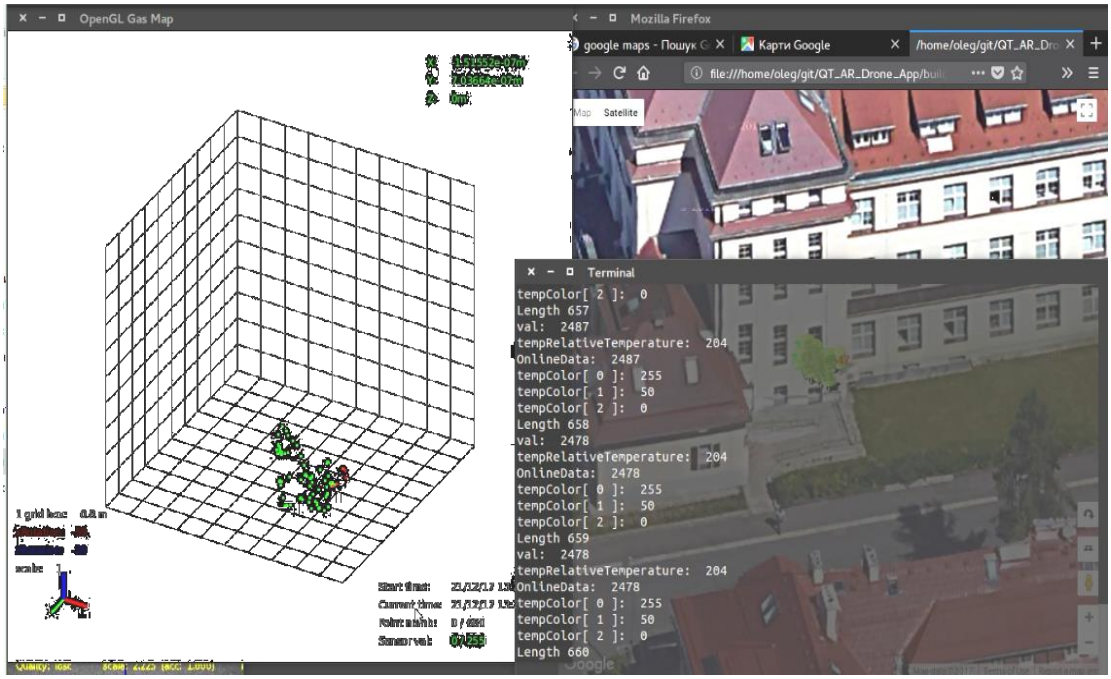


Рис. 12. Мапа газу під час тестування програми побудови мапи газу

Висновки

У ході даного проекту було розроблено мобільну систему для моніторингу якості повітря та наявності в ньому небезпечних газів на основі БПЛА. В ході розробки та тестування даної системи було створено програмний продукт для дистанційного отримання даних та їх обробки з подальшим складанням мапи загазованості території для візуалізації отриманих даних. Система має зв'язок з наземною станцією для можливості отримання результатів в режимі реального часу та їх миттєвої обробки.

References

1. Vachtsevanos G. J., Valavanis K. P. (2014) Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. (Springer Publishing Company).

2. Koval A., Irigoyen E. (2017) Mobile Wireless System for Outdoor Air Quality Monitoring. In: Graña M., López-Guede J., Etxaniz O., Herrero Á., Quintián H., Corchado E. (eds) International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16. ICEUTE 2016, SOCO 2016, CISIS 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 527. Springer, Cham.

3. Quigley M., Conley K., Gerkey B., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., Ng A.Y. (2009) Ros: an open-source robot operating system. In: ICRA Workshop on Open Source Software, vol. 3, p. 5.

4. Mani Monajjemi. Ardrone autonomy. Mani Monajjemi (2015). URL: https://ardrone-autonomy.readthedocs.io/en/latest/installation.html.

5. Repository for the tum_ardrone ROS package, implementing autonomous flight with PTAM-based visual navigation for the Parrot AR. Drone (2014). URL: http://wiki.ros.org/tum_ardrone.

6. Adam A. How to Calibrate a Monocular Camera (2017). URL: http://wiki.ros.org/camera_calibration/Tutorials/MonocularCalibration.

7. Grey C. Tutorial for calibrating the camera (2013). URL: http://wiki.ros.org/ethzasl_ptam/Tutorials/camera_calibration.

8. Arduino Yún. 2017. URL: https://store.arduino.cc/arduino-yun.

9. Sensor Humidity SHT1x datasheet (2010). URL: Rethttps://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf.

10. ROS Tutorials (2017). URL: http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials.

11. Hongrong H., Jürgen S. Tum_simulator (2014). URL: http://wiki.ros.org/tum_simulator.

12. GeoJSON (2016). URL: http://geojson.org/.

13. AR.Drone Developer Guide (2012). URL: https://jpchanson.github.io/ARdrone/ParrotDevGuide.pdf.

14. Github with code of the project (2017). URL: https://github.com/OlehQWERTY/QT_AR_Drone_App.git.

15. OpenGL Overview. URL: https://www.opengl.org/about/

Рецензія/Peer review : 3.11.2019 р. Надрукована/Printed : 04.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Полонський Л.Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-192-196
УДК 621.384.3

О.К. КУЧЕРЕНКО, Б.В. КИРИЧУК
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ПОЗИЦІЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОБ'ЄКТИВІВ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Мета статті – визначення вимог до точності пристроїв базування інфрачервоних об'єктивів в стендах для вимірювання модуляційної передавальної функції (МПФ). Важливість питання пов'язана з поширенням інфрачервоної техніки, зокрема до якості зображення, що створюють інфрачервоні об'єктиви. Основною характеристикою якості зображення є МПФ. Сучасні стенди визначення МПФ побудовані на експериментальному вимірюванні функції розсіювання лінії (ФРЛ) з наступним виконанням перетворення Фур'є. ФРЛ вимірюється в фокальній площині об'єктива. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3-4 %. Це призводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в конструкції вимірювального стенда передбачені пристрої ручного або автоматичного фокусування об'єктива в площину предметів фотоприймального пристрою. В роботі поставлене завдання визначити вимоги, які слід встановити до пристроїв ручного або автоматичного фокусування при базуванні типових ІЧ об'єктивів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5 %.

Ключові слова: інфрачервоні об'єктиви, модуляційна передавальна функція, стенди вимірювання МПФ, точність вимірювання.

O.K. KUCHERENKO, B.V. KYRYCHUK
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute»

DETERMINATION OF THE REQUIREMENTS FOR THE POSITIONING OF INFRARED LENSES IN THE MEASUREMENT OF THE MODULATION TRANSMISSION FUNCTION

The purpose of the article is to determine the accuracy requirements of infrared lens based devices in stands for measuring modulation transfer function. The importance of the issue has to do with the proliferation of infrared technology, including the quality of images produced by infrared lenses. The main characteristic of image quality is the modulation transfer function. Modern stands for determining the modulation-transfer function are based on the experimental measurement of the line scattering function, followed by the Fourier transform. Line scattering is measured in the focal plane of the lens. Constructional parameters errors cause the posterior focal length of the lens to deviate from the calculated value by 3-4%. This results in the measurement error of the modulation transfer function. Therefore, the design of the measuring stand includes devices for manual or automatic focusing of the lens in the plane of the objects of the photodetector. In order to reduce the impact of the error in determining the modulation transfer function, the measuring stand must have devices for accurately positioning the lens being monitored. The most detrimental cases are when the focal length of the lens is increased relative to the calculated value., so that the error of its determination does not exceed 5%.

Keywords: infrared lenses, modulation transfer function, MPF measurement stands, measurement accuracy.

Вступ

Стрімкий розвиток та застосування інфрачервоних (ІЧ) оптичних систем у вимірювальній, навігаційній, аграрній, військовій та авіаційно-космічній техніці для отримання точної та детальної інформації про об'єкт спостереження супроводжується проблемою передачі високоякісного зображення через оптичну систему (ОС) в цій спектральній області. Такі системи передбачають використання об'єктивів з високою, майже дифракційною, якістю зображення. Для контролю якості зображення об'єктива використовують атестаційні стенди. Принцип дії сучасних стендів побудований на вимірюванні функції розсіювання об'єктива з подальшим застосуванням перетворення Фур'є для визначення МПФ. МПФ універсальний критерій, який повністю характеризує якість ОС. Вона показує, як ОС відтворює різні просторові частоти. Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for Standardization – ISO) прийняла його як основний для оцінки якості ОС.

Постановка завдання

Вимірювання МПФ треба проводити в фокальній площині об'єктива, який випробується. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3-4 %. Це призводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в конструкції вимірювального стенда передбачені пристрої ручного або автоматичного фокусування об'єктива в площину предметів фотоприймального пристрою. В роботі поставлене завдання визначити вимоги, які слід встановити до пристроїв ручного або автоматичного фокусування в ході базування типових ІЧ об'єктивів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5 %. Принцип вимірювання заснований на використанні коліматорної установки з неперіодичним тест-об'єктом для експериментального визначення функції розсіювання лінії (ФРЛ) об'єктивів, що випробуються [1]. За результатами декількох вимірювань осереднені значення ФРЛ надходять до комп'ютера, який за певною програмою визначає середні значення МПФ. Для досліджень були використані типові схеми ІЧ об'єктивів з різними значеннями фокусних відстаней, діаметрів вхідної зіниці та кутів поля зору. Похибка, вплив якої аналізується, стосується вимог до чутливості пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктивів, при якій похибка вимірювання МПФ буде знаходитись в межах 5 %.

Принцип вимірювання МПФ та основні теоретичні положення

Схема вимірювального стенда наведена на рис. 1 [1]. Вимірювання засноване на тому, що потік випромінювання від джерела випромінювання 1 (рис. 1) ІЧ діапазону спектру конденсором 2 через світлофільтр 3, що виділяє ділянку спектра необхідного спектрального діапазону, направляється на тест-об'єкт щілину 4, яка розташована у фокальній площині коліматорного об'єктива 5. Випробувальний об'єктив 6 розташований у паралельному пучку променів та встановлений на автоматизований привід 7, який керується через контролер 8 комп'ютером 11. Зображення тест-об'єкта проектується об'єктивом 6 в площину фокусування фотоприймального пристрою, який містить еталонний мікрооб'єктив і мікробалометричну матрицю 9. Сигнал з матриці обробляється мікропроцесором 10, вводиться у комп'ютер 11, який з використанням перетворення Фур'є за заданим алгоритмом розраховує значення МПФ випробувального об'єктива.

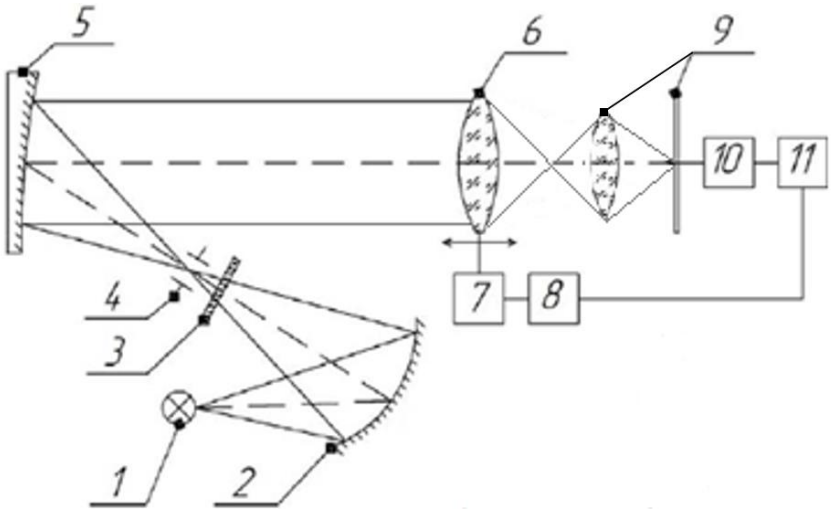


Рис. 1. Схема стенду для вимірювання МПФ інфрачервоних об'єктивів

Математично оптична передавальна функція (ОПФ), складовою якої є МПФ, є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. Під час визначення ФРЛ за допомогою матричного приймача використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно зі співвідношенням [1]:

$$\tilde{S}\left(\nu'_m\right) = T\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}\exp\left\{\frac{-j2\pi mk}{N}\right\}, \tag{1}$$

де T – період дискретизації значень ФРЛ; $S_{x'k}$ – нормоване значення ФРЛ; $k = 0,1,2...N-1$ – номер відліку у масиві ФРЛ; $m = 0,1,2...$ – номер дискретного значення просторової частоти; x' – лінійна координата в площині зображення.

З урахуванням (1) та формули Ейлера МПФ як модуль ОПФ дорівнює:

$$\tilde{S}(\nu'_m) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}\cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}\sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2}. \tag{2}$$

Якщо площина вимірювання МПФ зсунута по відношенню до фокальної площини ІЧ об'єктива на величину Δ, то значення МПФ відрізняється від розрахункового і визначається зі співвідношення [2]

$$\begin{aligned}\tilde{S}(\mathrm{R},\Delta) &= \frac{4}{\pi a}\cos aR\left\{\theta J_1(\mathrm{a}) - \sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{(-1)^n}{2n}\sin(2n\theta\cdot[\mathrm{J}_{2n-1}(\mathrm{a}) - \mathrm{J}_{2n+1}(\mathrm{a})])\right\} - \\ &- \frac{4}{\pi a}\sin aR\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{(-1)^n}{2n+1}\sin[(2\mathrm{n}+1)\theta]\cdot[\mathrm{J}_{2n}(\mathrm{a}) - \mathrm{J}_{2n+2}(\mathrm{a})],\end{aligned} \tag{3}$$

де $R = \nu\lambda K$ – просторова частота у відносних одиницях; Δ – розфокусування; ν – просторова частота в лініях на мм; λ – робоча довжина хвилі об'єктива; $K = \frac{f'}{D}$ – діафрагменне число; $a = \frac{\pi R\Delta}{\lambda K^2}$, $\theta = \arccos R$, $J_n(\mathrm{a})$ – функції Бесселя n-го порядку.

Співвідношення (3) було використане під час проведення математичного моделювання для визначення вимог до точності пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктивів в стенді вимірювання МПФ.

Результати дослідження

Моделювання проводилось для типових схем ІЧ об'єктивів. Для прикладу конструктивні параметри трьох схем ІЧ об'єктивів [3–5], які працюють в діапазоні довжин хвиль 8÷12 мкм, наведені в табл. 1÷3

Таблиця 1

Конструктивні параметри об'єктива № 1

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	56,4	6,59	
			Ge
R2	85,0	5,42	
			-
R3	-23,0	3,59	
			Ge
R4	-26,658	43,32	
			-
R5	23,0	7,15	
			Ge
R6	27,0	8,19	
			-
R7	∞	1,0	
			Ge
R8	∞	2,366	
$f' = 36,98$ мм, діафрагмове число $K = 1:1,24$, поле зору $2\omega = 12°$			

Таблиця 2

Конструктивні параметри об'єктива № 2

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	55,56	6,59	
			ІКС25
R2	158,63	5,42	
			-
R3	505,84	3,59	
			ZnSe
R4	92,63	43,32	
			-
R5	20,65	7,15	
			ІКС25
R6	21,41	8,19	
$f' = 50,1$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 12°$			

Таблиця 3

Конструктивні параметри об'єктива № 3

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	90,92	10,54	
			ІКС25
R2	291,28	8,88	
			-
R3	1017,81	6,13	
			ZnSe
R4	151,95	71,90	
			-
R5	30,92	5,55	
			Ge
R6	31,17	13,89	
$f' = 85,77$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 8°$			

Моделювання проводилося з використанням програми ZEMAX. До уваги приймалися залежності, за яких зсув Δ площини вимірювання МПФ спричиняв появу похибки її вимірювання в межах ±5 %. На рис. 2÷4 представлені графіки МПФ при розрахунковому положенні фокальної площини об'єктивів 1÷3 і при її зсувах, що спричиняють похибку вимірювання МПФ в межах 5 %.

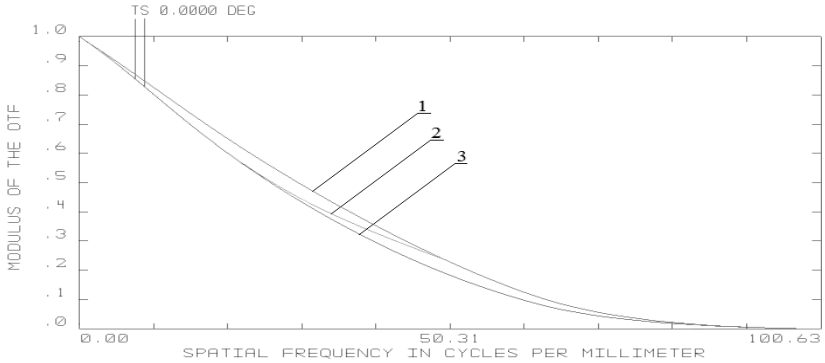


Рис. 2. Графік МПФ об'єктива 1: 1 – розрахункове положення фокального відрізку, 2 – зменшення фокального відрізку на 0.009 мм, 3 – збільшення фокального відрізку на 0.007 мм

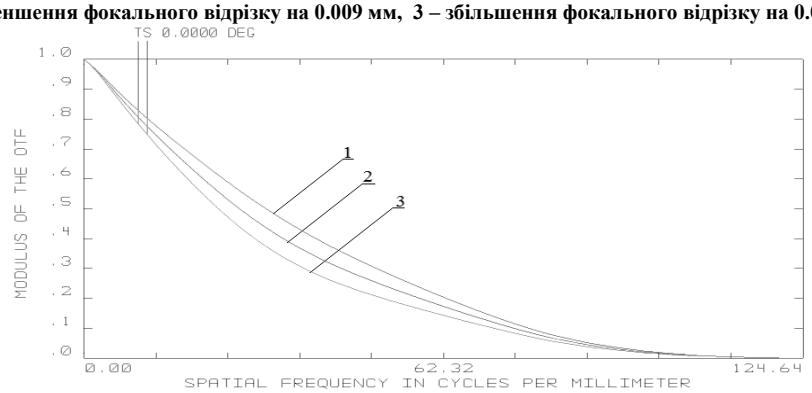


Рис. 3. Графік МПФ об'єктива 2: 1 – розрахункове положення фокального відрізку, 2 – зменшення фокального відрізку на 0.019 мм, 3 – збільшення фокального відрізку на 0.016 мм

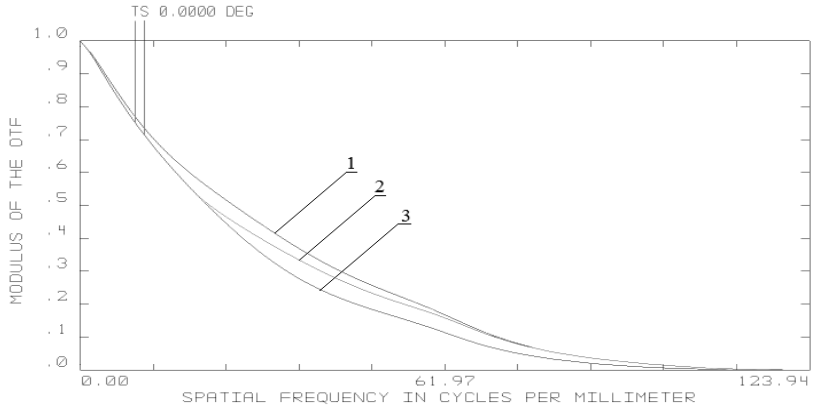


Рис. 4. Графік МПФ об'єктива 3: 1 – розрахункове положення фокальної площини, 2 – зменшення фокального відрізку на 0.026 мм, 3 – збільшення фокального відрізку на 0.018 мм

Математичне моделювання показало наступне:

– існують певні вимоги до пристроїв позиціювання ІЧ об'єктивів в стенді для вимірювання МПФ, що обумовлюють точність вимірювання в межах 5 %;

– зі зменшенням фокального відрізку об'єктива точність пристроїв позиціювання повинна бути підвищена;

– вимоги до пристроїв позиціювання в разі збільшення фокального відрізку жорсткіші і знаходяться в межах 7÷18 мкм;

– вимоги до пристроїв позиціювання в разі зменшення фокального відрізку знаходяться в межах 9÷26 мкм.

Висновки

Можливі відхилення фокального відрізку ІЧ об'єктивів від розрахункового значення, обумовлені похибками конструктивних параметрів, призводять до похибки визначення МПФ. Для зменшення впливу похибки визначення МПФ вимірювальний стенд повинен мати пристрої точного позиціювання об'єктива, який контролюється. Найбільш шкідливими є випадки, коли фокальний відрізок об'єктива збільшується по відношенню до розрахункового значення. Математичне моделювання показало, що похибка пристроїв позиціювання для забезпечення похибки вимірювання МПФ в 5 % повинна не перебільшувати 7÷9 мкм.

Література

1. Кучеренко О. К. Контроль качества сборки и юстировки объективов тепловизионных систем / О.К. Кучеренко И.А. Медведь // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 1. – С. 26–30.

2. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем / Шульман М.Я. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 224 с.

3. Патент 116386 Укр, МПК G02B 9/12. Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив / Банделюк О. В., Гусєв А. Ю., Колобродов В. Г. – № u 201606546 ; заявл. 15.06.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

4. Патент 118054 Укр, МПК G02B 13/14. Інфрачервоний об'єктив з термостабілізованою якістю зображення / Муравйов О. В., Романюк Т. А. – № u 201613027 ; заявл. 20.12.2016 ; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.

5. Патент 108282 Укр, МПК G02B 9/14. Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектру / Тягур В. М., Лихоліт М. І., Варьонова Г. Л. – № u 201308394 ; заявл. 04.07.2013 ; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 11.

References

1. Kucherenko O. K. Kontrol kachestva sborki i yustirovki obektivov teplovizionnyh sistem / O.K. Kucherenko I.A. Medved // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah. – 2012. – № 1. – S. 26–30.

2. Shulman M.Ya. Avtomaticheskaya fokusirovka opticheskih sistem / Shulman M.Ya. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1990. – 224 s.

3. Patent 116386 Ukr, MPK G02B 9/12. Infrachervonyi svitlosylnyi trylinzovyi obiektyv / Bandeliuk O. V., Husiev A. Yu., Kolobrodov V. H. – № u 201606546 ; zaiavl. 15.06.2016 ; opubl. 25.05.2017, Biul. № 10.

4. Patent 118054 Ukr, MPK G02B 13/14. Infrachervonyi obiektyv z termostabilizovanoiu yakistiu zobrazhennia / Muraviov O. V., Romaniuk T. A. – № u 201613027 ; zaiavl. 20.12.2016 ; opubl. 25.07.2017, Biul. № 14.

5. Patent 108282 Ukr, MPK G02B 9/14. Trylinzovyi atermalnyi svitlosylnyi obiektyv dlia infrachervonoho diapazonu spektru / Tiahur V. M., Lykholit M. I., Varonova H. L. – № u 201308394 ; zaiavl. 04.07.2013 ; opubl. 12.01.2015, Biul. № 11.

Рецензія/Peer review : 24.12.2019 р. Надрукована/Printed : 16.01.2020
Рецензент: к.т.н. Сокуренко В.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-197-201
УДК 004.272

Т.Б. МАРТИНЮК, А.В. КОЖЕМ'ЯКО, Л.М. КУПЕРШТЕЙН, О.С. БЕЗКРЕВНИЙ
Вінницький національний технічний університет

ОПЕРАЦІЙНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ БАЗИС ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розширення області прикладного застосування інтелектуальних систем потребує методів та засобів швидкісного високопаралельного оброблення значних масивів даних різної природи. Для цього необхідно визначити номенклатуру операційно-елементного базису для апаратної реалізації базових процедур в інтелектуальних системах. Широке застосування нейротехнологій потребує доповнити відомий список базових функціональних вузлів за рахунок введення лінійки екстрематорів, детектора максимуму і дискримінатора. Ці вузли, реалізовані на перспективній елементній базі, значно прискорять процес паралельного оброблення даних, підвищать надійність та компактність при апаратній реалізації блоків та підсистем інтелектуальних систем.

Ключові слова: інтелектуальна система, операційно-елементний базис, нейротехнології, класифікація, система керування.

T.B. MARTYNIUK, A.V. KOZHEMIAKO, L.M. KUPERSHTEIN, O.S. BEZKREVNYI
Vinnytsia National Technical University

OPERATING-ELEMENTAL BASIS FOR INTELLIGENT SYSTEMS

Expanding of the field of intelligent systems application requires the methods and means of high-speed processing of large data sets of different nature. For this purpose it is necessary to define the nomenclature of the operating-elemental basis for the hardware implementation of basic procedures in intelligent systems. The widespread use of neurotechnology requires supplementing the well-known list of basic functional units by introducing a line of extremators, a maximum detector and a discriminator. These units, implemented on a promising element base, will greatly accelerate the process of parallel data processing, increase reliability and compactness in hardware implementation of blocks and subsystems of intelligent systems.

Keywords: intelligent system, operating-elemental basis, neurotechnology, classification, control system.

Вступ

Аналіз операційних складових найбільш розповсюджених інформаційних технологій, а саме, оброблення та аналізу сигналів і зображень, а також розпізнавання образів [1–3] дозволяє визначити такі базові процедури, як фільтрація, згортка, кореляція, класифікація, паралельний пошук і нейрообчислення. Ці процедури потребують виконання таких базових операцій, як векторно-матричне перемноження, сортування, визначення екстремальних значень, ранжування, порівняння з еталоном, паралельне порівняння [2–4].

Актуальність

Наочним також є факт, що найбільшу складову серед нейрообчислень має формування добутку вектора біжучого стану мережі на матрицю міжнейронних зв'язків, для прискорення чого застосовують апаратні нейроакселератори [1, 2]. Все це дозволяє серед наведених вище базових операцій визначити особливе місце операції множення матриці на вектор, яка широко використовується не тільки при моделюванні нейромереж, але й при розв'язанні прикладних задач у системах оброблення й аналізу зображень, при розпізнаванні образів, у машинній графиці, для реалізації обчислень з плаваючою комою [3–5].

Отже, метою даної роботи є обґрунтування операційно-елементного базису для інтелектуальних систем, що призначені для реалізації базових процедур нейро- та інформаційних технологій.

Постановка задачі

Сучасні нейрокомп'ютери як складова інтелектуальних систем найчастіше реалізуються як програмний продукт, а тому залишається нереалізованою здатність штучних нейромереж до паралельного оброблення великих масивів даних. Таким чином, необхідним є проектування, виробництво і застосування спеціалізованих нейрочипів і плат розширення, що призначені для оброблення мовленнєвих сигналів, відео і статичних зображень та інших типів образної інформації, а отже, у повній мірі реалізують всі переваги штучних нейромереж [1, 6].

З іншого боку, зростання питомої ваги апаратних реалізацій нейронів та нейромережних апаратно-програмних компонентів, наприклад, у робототехніці і у зразках побутової техніки (фотоапарати, відеокамери, мікрохвильові печі тощо) обумовлено рядом об'єктивних чинників [7]. У першу чергу, це пов'язано з необхідністю забезпечити для достатньо складних задач високу швидкість їх розв'язання з використанням масового паралелізму, надійність експлуатації спеціального апаратного забезпечення у польових умовах при суттєвих обмеженнях на габарити та вагу, а також при жорстких вимогах до безпеки системи (захист від несанкціонованого доступу і захист авторських прав на схемотехнічні та архітектурні рішення) [7].

Обґрунтування номенклатури операційно-елементного базису для інтелектуальних систем

Нижче наведено найбільш наочні та ефективні приклади використання нейротехнологій в інтелектуальних системах. Так в інтелектуальних адаптивних системах керування, здатних підлаштовуватись до потрібного діапазону зовнішніх умов, не має альтернативи нейромережним методам, які представляють собою один з імітаційних підходів створення таких систем [1, 6, 8]. При цьому, серед процедур використовуваних при керуванні, наприклад, для роботів важливе місце займають класифікація поточного стану і прийняття рішення про подальший розвиток процесу.

У роботі [9] представлено систему керування мобільним роботом на базі технічної нервової системи із зором. На рис. 1 наведено таку базову навчену систему керування роботом, яку у роботі [10] названо "технічним мозком". У схемі використовуються такі позначення: ВД – виконавчий двигун; СЗ – система зчутливлювання; ЗЗ – зворотний зв'язок; b – збудження рецептора; c – ваговий коефіцієнт рецептора; E – сигнал керування для ВД; N – кількість ВД.

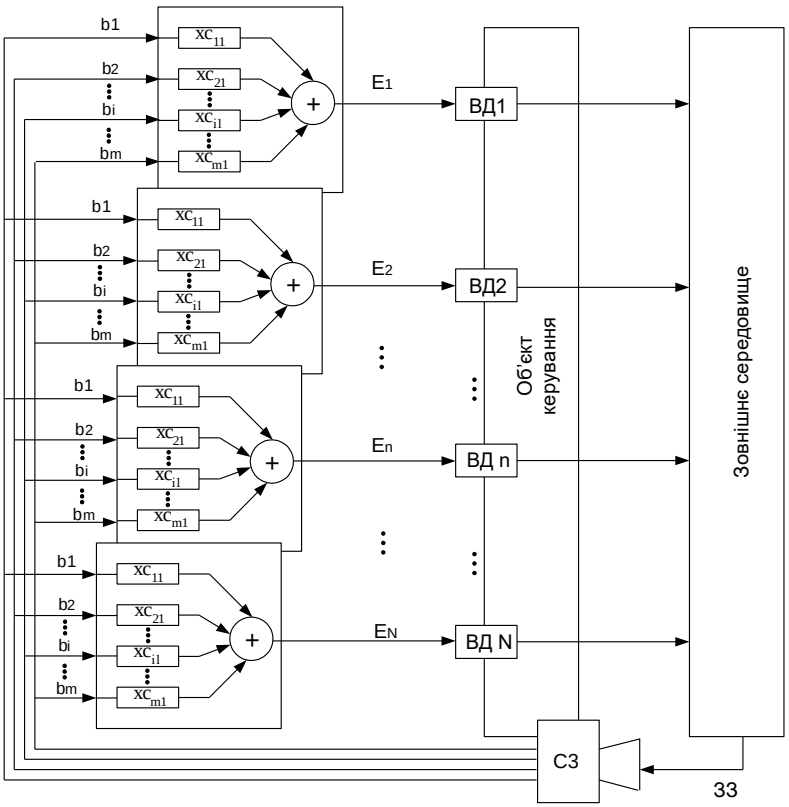


Рис. 1. Блок-схема навченої системи керування

Зі схеми на рис. 1 видно, що сигнал для відповідного ВД формується у вигляді зваженої суми сигналів збудження m рецепторів. Отже, одним із базових вузлів, виходячи з рис. 1, є вузол що містить m помножувачів, пам'ять ваг і багатовхідний суматор [4, 11, 12].

Про необхідність використання багатовхідних суматорів як базових вузлів нейроподібних складових інтелектуальних гібридних систем керування свідчить їх застосування, наприклад, у нечіткій нейромережі на базі алгоритму Сугено 0-го порядку [13]. Перший і другий шари такої нейромережі виконують оброблення даних за правилами нечіткої логіки, а третій шар, що складається з двох нейронів, виконує підсумовування і зважене підсумовування вихідних сигналів другого шару.

Ще одним привабливим та наочним є приклад застосування процедури розпізнавання сигналів та зображень на базі нейротехнологій у медичній сфері, а саме, метод класифікації біомедичних сигналів за дискримінантними функціями (ДФ) [14]. Процедуру класифікації за ДФ можна подати у такому вигляді, як на рис. 2, з якого наочно видно всі ознаки нейромережного підходу до такої класифікації [14, 15].

Так, для формування m ДФ $g_1(Z),\ldots,g_m(Z)$ використовується одношаровий персептрон, який містить m формальних нейронів (так звані лінійні нейрони) [1, 6, 7]. А для формування вихідного сигналу належності вхідного вектора Z до певного класу C_{i0} необхідним є детектор максимуму, функцію якого виконує конкурентний шар нейронів з латеральними зв`язками як у класичних мережі Хопфілда і мережі Хеммінга [1]. Апаратна реалізація такого нейромережного класифікатора обумовлена необхідністю його компактного оформлення, а головне – забезпечення його функціонування в реальному часі [12, 17].

Наведені приклади базових обчислювальних операцій для інтелектуальних систем дозволяють визначити набір функціональних вузлів, за допомогою яких можна реалізувати не тільки операції матричної алгебри, але й асоціативно-логічні операції, а саме, порівняння, сортування, виділення екстремальних елементів у масиві даних, їх ранжування тощо [4]. Такий набір базових операцій збігається з визначеним набором для цифрової обробки сигналів (ЦОС), наведеним у роботі [5]. Відповідно номенклатура набору функціональних вузлів для ЦОС містить (табл. 1) [5]: лінійку суматорів-віднімачів, лінійку суматорів накопичувального типу, багатовхідний суматор, лінійку помножувачів, лінійку поділювачів, лінійку сортувальних комірок. Такий набір відповідає двом важливим умовам: а) номенклатура його вузлів порівняно невелика; б) на базі цього набору можна реалізувати максимально широкий клас перетворень та алгоритмів [5].

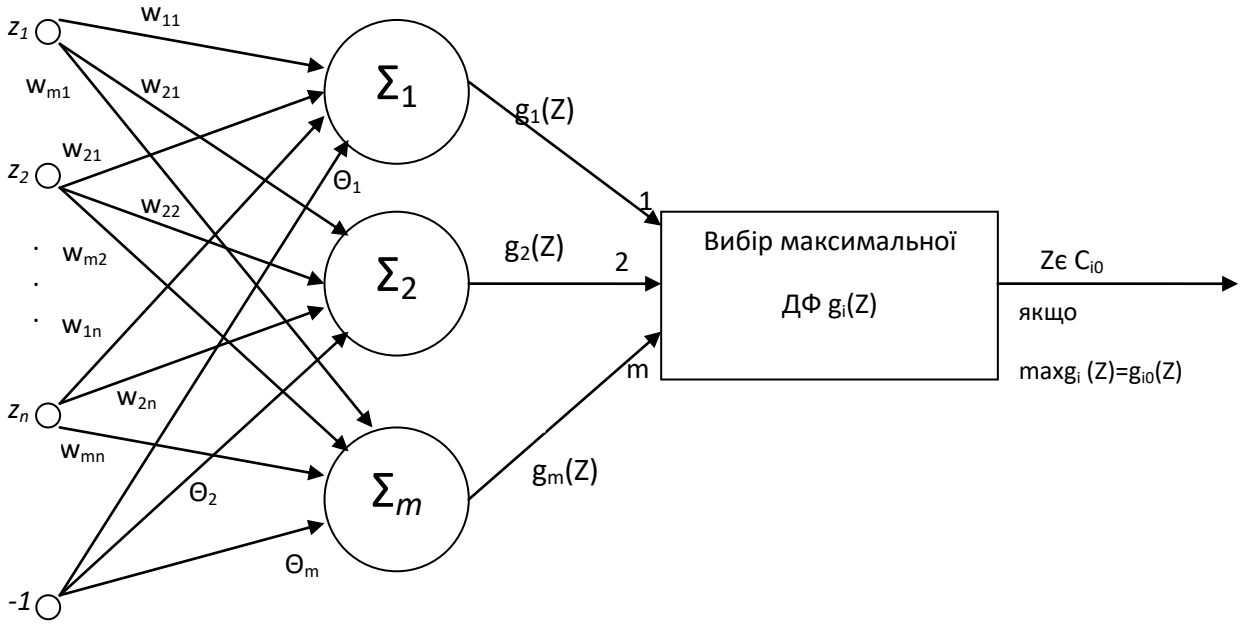


Рис. 2. Схема класифікації за дискримінантними функціями

Таблиця 1

Номенклатура базових функціональних вузлів

Найменування вузла	Функція	Область застосування
Лінійка суматорів-віднімачів	$y_k = x_{2k-1} \pm x_{2k}$ $k = \overline{1,n}$	Оброблення та аналіз сигналів і зображень
Лінійка суматорів накопичувального типу	$y_i = \sum_{j=1}^{N-1}\left(x_j + x_{j+1}\right)$ $i = \overline{1,n}$	Оброблення та аналіз сигналів і зображень
Багатовхідний суматор	$y = \sum_{j=1}^{N} x_j$	Оброблення та аналіз сигналів і зображень, розпізнавання образів
Лінійка помножувачів	$y_k = x_{2k-1} \cdot x_{2k}$ $k = \overline{1,n}$	Оброблення та аналіз сигналів і зображень, розпізнавання образів
Лінійка поділювачів	$y_k = \frac{x_{2k-1}}{x_{2k}}$ $k = \overline{1,n}$	Оброблення сигналів і зображень
Лінійка сортувальних комірок	$y_k^1 = \max(x_{2k-1}, x_{2k})$ $y_k^2 = \min(x_{2k-1}, x_{2k})$ $k = \overline{1,n}$	Оброблення сигналів і зображень (фільтрація)
Лінійка екстрематорів	$y_i = extr\left\{x_j\right\}$ $i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,N}$	Аналіз сигналів і зображень, розпізнавання образів
Детектор максимуму	$y = max\left\{g_i\right\}$ $i = \overline{1,n}$	Розпізнавання образів, класифікація сигналів
Дискримінатор	$g_i = \sum_{j=1}^{N} w_j \cdot x_j$ $i = \overline{1,n}$	Розпізнавання образів, класифікація сигналів

Разом з тим, враховуючи важливу роль, що відіграє у багатьох інтелектуальних системах класифікація вхідних сигналів, доцільним є введення у наведений набір таких функціональних вузлів, як

лінійка екстрематорів, детектор максимуму та дискримінатор (табл. 1) [18, 19]. Так, детектор максимуму є необхідним вузлом при виборі максимального сигналу від лінійки суматорів (рис. 2), що, в свою чергу, дозволяє визначити клас, до якого належить вхідний образ [14, 15, 18]. З іншого боку, враховуючи скалярність виходу лінійного нейрона, останній можна розглядати як лінійний дискримінатор (рис. 1, 2) [1, 12, 16, 17].

Висновки

Швидкісна обробка значних масивів інформації різної природи в таких областях, як оброблення, аналіз сигналів та зображень і розпізнавання образів, потребує високопаралельних апаратних засобів у складі інтелектуальних систем. А це, у свою чергу, потребує визначення номенклатури операційно-елементного базису для реалізації базових процедур в інтелектуальних системах для вирішення широкого спектра прикладних задач.

Аналіз наочних прикладів використання нейротехнологій в інтелектуальних системах, зокрема в навчених системах керування роботами та класифікаторах біомедичних сигналів, дозволяє розширити відомий список базових функціональних вузлів. Так у цей список введено лінійку екстрематорів, детектор максимуму і дискримінатор.

Апаратна реалізація визначених базових вузлів на перспективній елементній базі, наприклад, на ПЛІС або з використанням сучасних оптоелектронних технологій, дозволить значно прискорити процес паралельного оброблення інформації в інтелектуальних системах, підвищити їх надійність та компактність при апаратній реалізації.

Література

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский ; пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 344 с. – ISBN 5-279-02567-4.

2. Цмоць І.Г. Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі / І.Г. Цмоць. – Львів, 2005. – 228 с. – ISBN 966-322-024-4.

3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт ; пер. с англ. – В 2-х кн. – М. : Мир, 1982. – 792 с.

4. Мартинюк Т.Б. Аналіз операційного базису для нейромережевих інтелектуальних систем / Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем`яко, Н.О. Денисюк, Т.Ю. Позднякова // Інформаційні технології та комп`ютерна інженерія. – 2015. – № 2 (33). – С. 83–87. – ISSN 1999-9994.

5. Царев А.П. Алгоритмические модели и структуры высокопроизводительных процессоров цифровой обработки сигналов / А.П. Царев. – Szczecin, Informa, 2000. – 237 с. – ISBN 83-87362-34-4.

6. Использование нейронных сетей [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.neuroproject.ru/articles _ dak _ nn.php.

7. Обзор элементной базы аппаратных реализаций нейронных сетей [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.reshebnik.net.ru.

8. Васюра А.С. Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування / А.С. Васюра, Т.Б. Мартинюк, Л.М. Куперштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 175 с. – ISBN 978-966-641-279-2

9. Прукс В.Э. Система управления мобильного робота на основе технической нервной системы со зрением / В.Э. Прукс, А.Э. Прукс // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) : I Міжнар. наук.-техн. конф., 10-13 травня 2011 р. – Черкаси: Маклаут, 2011. – С. 229. – ISBN 978-966-2200-11-9.

10. Буков А.А. Технические нервные системы. Обучаемые системы управления со зрением для промышленных роботов / А.А. Буков. – Липецк : Изд-во Липецк. гос. техн. ун-та, 2001. – 223 с.

11. Мартинюк Т.Б. Адаптивний суматор для систем керування роботом / Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, Н.В. Фофанова, О.М. Наконечний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 2(10). – С. 96–101. – ISSN 1681-7893.

12. Мартынюк Т.Б. Аппаратная реализация модели формального нейрона / Т.Б. Мартинюк, Л.И. Тимченко, Л.М. Куперштейн // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32, № 4. – С. 35–47. – ISSN 0204-3572.

13. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001. – 143 с. – ISBN 5-93517-181-3.

14. Бернюков А.К. Распознавание биоэлектрических сигналов / А.К. Бернюков, Л.Т. Сушкова // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 12. – С. 47–51. – ISSN 0373-2428.

15. Мартынюк Т.Б. Классификатор биомедицинских сигналов / Т.Б. Мартынюк, А.Г. Буда, В.В. Хомюк, А.В. Кожемяко, Л.М. Куперштейн // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 88–95. – ISSN 1561-5359.

16. Мартынюк Т.Б. Модель порогового нейрона на основе параллельной обработки по разностным срезам / Т.Б. Мартынюк // Кибернетика и системный анализ. – 2005. – № 4. – С. 78-89. – ISSN 0023-1274.

17. Кожемяко В.П. Модель "быстрого нейрона" с обработкой данных по принципу разностных срезов / В.П. Кожемяко, Т.Б. Мартынюк, Л.М. Куперштейн // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2(18). – С. 87–98. – ISSN 1681-7893.

18. Куссуль Э.М. Нейросетевые классификаторы для распознавания рукописных символов / Э.М. Куссуль, Л.М. Касаткина, В.В. Лукович // Управляющие системы и машины. – 1999. – № 4. – С. 77–86. – ISSN 0130-5395.

19. Мартинюк Т.Б. Реалізація концепції різницевих зрізів при обробленні зображень та розпізнаванні образів / Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001. – № 1. – С. 79–85. – ISSN 1681-7893.

References

1. Osovskij S. Nejronnye seti dlya obrabotki informacii / S. Osovskij ; per. s polsk. I.D. Rudinskogo. – M. : Finansy i statistika, 2004. – 344 s. – ISBN 5-279-02567-4.

2. Tsmots I.H. Informatsiini tekhnolohii ta spetsializovani zasoby obrobky syhnaliv i zobrazhen u realnomu chasi / I.H. Tsmots. – Lviv, 2005. – 228 s. – ISBN 966-322-024-4.

3. Prett U. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / U. Prett ; per. s angl. – V 2-h kn. – M. : Mir, 1982. – 792 s.

4. Martyniuk T.B. Analiz operatsiinoho bazysu dlia neiromerezhevykh intelektualnykh system / T.B. Martyniuk, A.V. Kozhem`iako, N.O. Denysiuk, T.Iu. Pozdniakova // Informatsiini tekhnolohii ta komp`iuterna inzheneriia. – 2015. – № 2 (33). – S. 83–87. – ISSN 1999-9994.

5. Carev A.P. Algoritmicheskie modeli i struktury vysokoproizvoditelnyh processorov cifrovoj obrabotki signalov / A.P. Carev. – Szczecin, Informa, 2000. – 237 s. – ISBN 83-87362-34-4.

6. Ispolzovanie nejronnyh setej [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.neuroproject.ru/articles – dak – nn.php.

7. Obzor elementnoj bazy apparatnyh realizacij nejronnyh setej [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.reshebnik.net.ru.

8. Vasiura A.S. Metody ta zasoby neiropodibnoi obrobky danykh dlia system keruvannia / A.S. Vasiura, T.B. Martyniuk, L.M. Kupershtein. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. – 175 s. – ISBN 978-966-641-279-2

9. Pruks V.E. Sistema upravleniya mobilnogo robota na osnove tehnicheskoj nervnoj sistemy so zreniem / V.E. Pruks, A.E. Pruks // Obchislyuvalnij intelekt (rezultati, problemi, perspektivi) : I Mizhnar. nauk.-tehn. konf., 10-13 travnya 2011 r. : materiali. – Cherkasi: Maklaut, 2011. – S. 229. – ISBN 978-966-2200-11-9.

10. Bukov A.A. Tehnicheskie nervnye sistemy. Obuchaemye sistemy upravleniya so zreniem dlya promyshlennyh robotov / A.A. Bukov. – Lipeck : Izd-vo Lipeck. gos. tehn. un-ta, 2001. – 223 s.

11. Martinyuk T.B. Adaptivnij sumator dlya sistem keruvannya robotom / T.B. Martinyuk, A.V. Kozhem'yako, N.V. Fofanova, O.M. Nakonechnij // Optiko-elektronni informacijno-energetichni tehnologiyi. – 2005. – № 2(10). – S. 96–101. – ISSN 1681-7893.

12. Martynyuk T.B. Apparatnaya realizaciya modeli formalnogo nejrona / T.B. Martinyuk, L.I. Timchenko, L.M. Kupershtejn // Elektronnoe modelirovanie. – 2010. – T. 32, № 4. – S. 35–47. – ISSN 0204-3572.

13. Uskov A.A. Intellektualnye tehnologii upravleniya. Iskusstvennye nejronnye seti i nechyotkaya logika / A.A. Uskov, A.V. Kuzmin. – M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2001. – 143 s. – ISBN 5-93517-181-3.

14. Bernyukov A.K. Raspoznavanie bioelektricheskih signalov / A.K. Bernyukov, L.T. Sushkova // Zarubezhnaya radioelektronika. – 1996. – № 12. – S. 47–51. – ISSN 0373-2428.

15. Martynyuk T.B. Klassifikator biomedicinskih signalov / T.B. Martynyuk, A.G. Buda, V.V. Homyuk, A.V. Kozhemyako, L.M. Kupershtejn // Iskusstvennyj intellekt. – 2010. – № 3. – S. 88–95. – ISSN 1561-5359.

16. Martynyuk T.B. Model porogovogo nejrona na osnove parallelnoj obrabotki po raznostnym srezam / T.B. Martynyuk // Kibernetika i sistemnyj analiz. – 2005. – № 4. – S. 78-89. – ISSN 0023-1274.

17. Kozhemyako V.P. Model "bystrogo nejrona" s obrabotkoj dannyh po principu raznostnyh srezov / V.P. Kozhemyako, T.B. Martynyuk, L.M. Kupershtejn // Optiko-elektronni informacijno-energetichni tehnologiyi. – 2009. – № 2(18). – S. 87–98. – ISSN 1681-7893.

18. Kussul E.M. Nejrosetevye klassifikatory dlya raspoznavaniya rukopisnyh simvolov / E.M. Kussul, L.M. Kasatkina, V.V. Lukovich // Upravlyayushie sistemy i mashiny. – 1999. – № 4. – S. 77–86. – ISSN 0130-5395.

19. Martyniuk T.B. Realizatsiia kontseptsii riznytsevykh zriziv pry obroblenni zobrazhen ta rozpiznavanni obraziv / T.B. Martyniuk, A.V. Kozhemiako // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2001. – № 1. – S. 79–85. – ISSN 1681-7893.

Рецензія/Peer review : 12.12.2019 р. Надрукована/Printed : 16.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Яровий А.А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-202-205
УДК 681.7.067.25

В.М. СОКУРЕНКО, І.О. СМАЖКО
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ SWIR-ОБ'ЄКТИВА

Запропоновано здійснювати автоматизований розрахунок оптичної системи об'єктива для короткохвильового інфрачервоного діапазону (short-wave infrared, SWIR) за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференційної еволюції Коші. Завдяки використанню розробленого спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованому режимі виконано експериментальну перевірку дієздатності такого підходу на прикладі розрахунку об'єктива, аналогічного комерційно доступному зразку. Інтервал часу, що потрібен для розробки оптичної системи SWIR-об'єктива з кількістю пошукових параметрів біля 50, не перевищує декількох годин. Результати проведених досліджень свідчать про те, що вище зазначений алгоритм можна вважати ефективним інструментом, який дозволяє виконати автоматизований параметричний синтез та визначити конструктивні параметри оптичної системи з високою якістю зображення.

Ключові слова: автоматизований розрахунок, SWIR, оптична система, об'єктив, глобальна оптимізація, параметричний синтез.

V.M. SOKURENKO, I.O. SMAZHKO
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

AUTOMATED OPTICAL SYSTEM DESIGN OF THE SWIR-LENS

In contrast to the imaging systems operating purely in the visible spectrum, the short-wave infrared (SWIR) systems have serious advantages and can be applied for inspection, quality control of products, surveillance, sorting, etc. In this paper, we propose to perform an automated optical system design of a SWIR-lens with the help of one of modern global optimization algorithms, namely the adaptive Cauchy differential evolution method. At the first stage, a designer should enter the input data, indicate variable parameters, set necessary restrictions, and generate the desired merit function. Then, the global optimization algorithm is launched. The design process itself is fulfilled completely automatically, and there is no need for active participation of the designer. By using the developed specialized software, we performed an experimental validation of this approach on an example of designing a SWIR-lens similar to commercially available one. The time interval required for the design process does not exceed several hours for an optical system having the total number of unknown parameters about 50. The developed optical system of the SWIR-lens has the effective focal length 50 mm, the angular field of view 23°, and F-number 1.4. It is intended to be used in the spectral range 0.9 to 1.7 μm with the main wavelength 1.3 μm. The maximum polychromatic RMS spot radius is smaller than 16 μm over the full field. The relative distortion does not exceed 0.25%. The polychromatic MTF values at the spatial frequency 40 lines/mm are higher than 0.4 across the full field in both the meridional and sagittal cross-sections. The results of the research indicate that the implemented algorithm can be considered to be an effective tool which allows to perform automated parametric synthesis and determine prescription data of the optical system with high image quality.

Keywords: automated optical design, SWIR, optical system, lens, global optimization, parametric synthesis.

Вступ

SWIR-випромінювання – це загальноприйнята назва електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,9…1,7 мкм, хоча іноді цей діапазон розширюється до значень 0,7…2,5 мкм [1]. На відміну від середньо- та довгохвильового інфрачервоного випромінювання, SWIR-діапазон є схожим до видимого світла, адже його фотони характерно відбиваються та поглинаються об'єктами та забезпечують значний контраст. Останнє дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю. Крім того, завдяки атмосферному явищу світіння нічного неба, утворюється в п'ять-сім разів більше випромінювання, ніж виключно від зірок. Тому SWIR-камери дозволяють спостерігати об'єкти з великою чіткістю в безмісячні ночі.

З іншої сторони, за допомогою SWIR-випромінювання можна здійснити низку досліджень або вимірювань, які практично неможливо виконати за допомогою видимого світла. Водяна пара, туман та такі речовини як, наприклад, силікон є прозорими у SWIR-діапазоні. Крім того, кольори, які у видимому діапазоні спостерігаються як майже ідентичні, чітко розрізняються в діапазоні SWIR [1].

SWIR-об'єктиви можуть виготовлятися за тими ж технологіями, що використовуються для компонентів видимого діапазону, адже оптичне скло є прозорим для довжин хвиль 0,9…1,7 мкм. Це знижує витрати на їх виробництво та робить можливим використання різних фільтрів та вікон в рамках однієї системи [2].

Оскільки SWIR-сенсори та камери переходять у фазу швидкого розвитку, постає необхідність розробки якісних інфрачервоних об'єктивів з високою роздільною здатністю та малими значеннями монохроматичних і хроматичних аберацій.

Огляд методів проектування оптичних систем

Для аберраційного розрахунку оптичних систем поширеним є метод, що базується на основі теорії аберацій 3-го та 5-го порядків [3]. Інший підхід зводиться до використання методу локальної оптимізації. За своєю суттю, алгоритми локальної оптимізації поліпшують поточний розв'язок шляхом здійснення відносно невеликих локальних змін. Для цього, зазвичай, на кожному кроці розраховуються перші та другі похідні. Ітераційний процес продовжується до тих пір, поки він не зійдеться до оптимального розв'язку або поки не буде вичерпано певний ліміт часу чи кількості спроб. В цілому, зазначені підходи виявилися ефективними для розв'язання ряду багатовимірних задач. Зокрема, їх часто застосовують для розробки оптичних систем

різноманітного призначення. Проте, незважаючи на вказані позитивні сторони, розглянуті «класичні» методики мають ряд недоліків, головними з яких є обмеженість розв'язку абераціями нижчих порядків або потреба в якісній стартовій оптичній системі. Тому й виникла необхідність в «універсальному» підході, який не потребував би якісної вихідної системи та досвіду висококваліфікованого розробника.

Велику низку різнопланових та багатовимірних задач, які розв'язати аналітично неможливо, допомагає вирішити глобальна оптимізація (ГО) – галузь прикладної математики та числового аналізу. Результат дії ГО – знаходження найкращого елемента з багатовимірної множини можливих елементів, що задовольняє заданому критерію. Як правило, такі критерії представляються математичними функціями та мають назву цільових (або оціночних) функцій. За останні роки розроблено значну кількість алгоритмів ГО як детермінованих, так і стохастичних. Серед останніх поширення набули алгоритми випадкового пошуку, імітаційного відпалу, а також різні еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми, методи еволюційної стратегії, методи диференційної еволюції тощо) [4–6].

Постановка задачі

Метою даної роботи є перевірка (шляхом комп'ютерного моделювання) результативності та ефективності автоматизованого параметричного абераційного синтезу оптичної системи SWIR-об'єктива засобами глобальної оптимізації.

Для синтезу оптичної системи об'єктива в даній роботі пропонується використовувати один із сучасних методів ГО – адаптивний метод диференційної еволюції Коші [7, 8]. Особливістю цього методу є те, що кожен змінний пошуковий параметр має свої значення характерних числових параметрів диференційної еволюції. Сутність такого підходу зводиться до того, що на кожній новій ітерації алгоритму його параметри визначаються на основі середніх значень показників, отриманих під час попередніх ітерацій. Фактично розглянуті параметри адаптуються до реальної оціночної функції. Відмінністю цього методу є також те, що нові значення показників генеруються на основі розподілу Коші, який дозволяє отримувати випадкові значення з більшим відхиленням від середніх значень, в порівнянні з гаусоподібним (нормальним) розподілом.

Розроблена комп'ютерна програма з реалізованим у ній вищезазначеним алгоритмом дозволяє в автоматичному режимі визначити конструктивні параметри оптичної системи. Переважно до них належать радіуси кривизни поверхонь, осьові товщини лінз, осьові повітряні проміжки та параметри оптичних середовищ. В більш складних випадках як параметри оптимізації можуть використовуватися коефіцієнти асферичності та специфічні параметри оптичних поверхонь та середовищ (різноманітних дифракційних граток, градієнтних середовищ тощо) [9–13].

Запропонований підхід

Перед розв'язанням поставленої задачі параметричного синтезу оптичної системи розробнику спочатку необхідно визначитися з типом системи, кількістю лінз та основними функціональними параметрами системи (полем зору, типом апертури, відносним отвір тощо).

Далі мають бути вибрані параметри оптимізації та сформована оціночна функція. Зазвичай, базова «стандартна» оціночна функція – це функція мінімізації середньоквадратичних розмірів світлових плям на поверхні зображень для всіх заданих пучків (тобто точок поля зору). Альтернативно може бути застосована функція мінімізації деформацій хвильового фронту для всіх заданих пучків. Як правило, оціночна функція містить також складові елементи для контролю діапазонів допустимих значень параметрів та обмежень, необхідних для отримання системи, яку можна фізично реалізувати. Для спрощення задання оціночної функції її складові елементи генеруються автоматично засобами розробленого програмного забезпечення. Додатково конструктором можуть задаватися бажані або граничні значення для функціональних та конструктивних параметрів системи, її аберацій, параметрів довільних променів тощо.

Обравши параметрами оптимізації (радіуси змінних поверхонь, повітряні проміжки, осьові товщини лінз та ін.), конструктор має ввести для них допустимі діапазони та практично довільні стартові значення.

Встановлення регулятора вихідного кута апертурного променю на останній оптичній поверхні об'єктива дозволяє забезпечити бажане фіксоване значення задньої фокусної відстані системи. У разі потреби є можливість обмежити довжину оптичної системи вздовж осі, задати максимально допустиме значення дисторсії, граничне значення кута головного променю похилого пучка в просторі зображень (для забезпечення телецентричності вихідних пучків) тощо.

Наступний етап – безпосереднього розрахунку – є найбільш тривалим, адже він передбачає автоматичну процедуру глобальної оптимізації за одним із закладених у програму алгоритмів. Цей процес є повністю автоматичним та не потребує активної участі конструктора.

Після завершення процедури глобальної оптимізації оптична система набуває практично кінцевого вигляду, однак за необхідності з метою остаточного «доведення» системи або скорочення тривалості розрахунків можна скористатися локальною оптимізацією.

Приклад параметричного синтезу

Як приклад для розрахунку було обрано об'єктив «OB-SWIR 50» з каталогу компанії Optec [14]. Його оптична система має фокусну відстань 50 мм, кутове поле зору 23°, діафрагмове число F/1.4. Об'єктив призначений для роботи у спектральному діапазоні 0,9…1,7 мкм з основною довжиною хвилі 1,3 мкм.

Під час параметричного синтезу об'єктива з ідентичними параметрами було встановлено обмеження на мінімальну та максимальну осьові товщини – 1 мм і 7 мм відповідно, мінімальну товщину на краю – 2 мм та максимальне допустиме значення дисторсії – 0,5%.

Оптична схема отриманого об’єктива представлена на рис. 1.

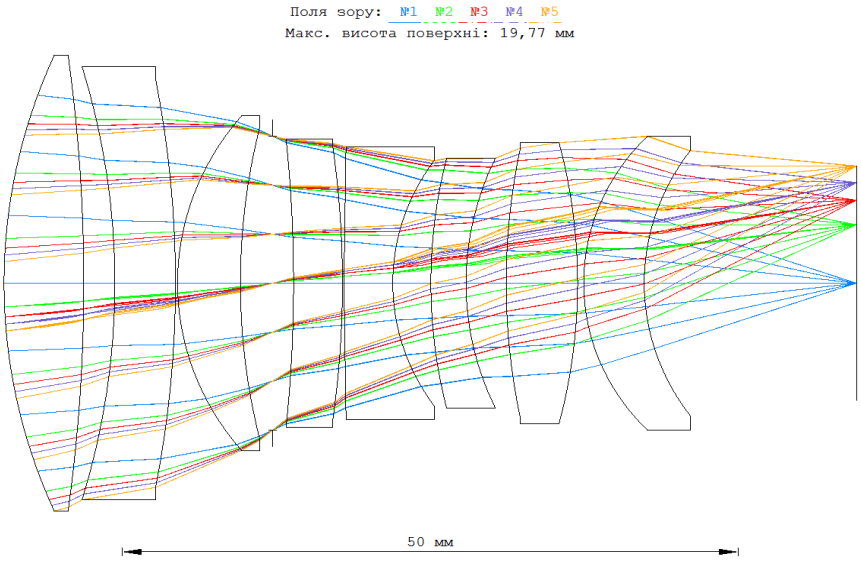


Рис. 1. Оптична схема з ходом променів розробленого об’єктива для SWIR діапазону

Як видно з рис. 2, максимальне значення середньоквадратичних радіусів світлових плям в поліхроматичному світлі не перевищує 16 мкм.

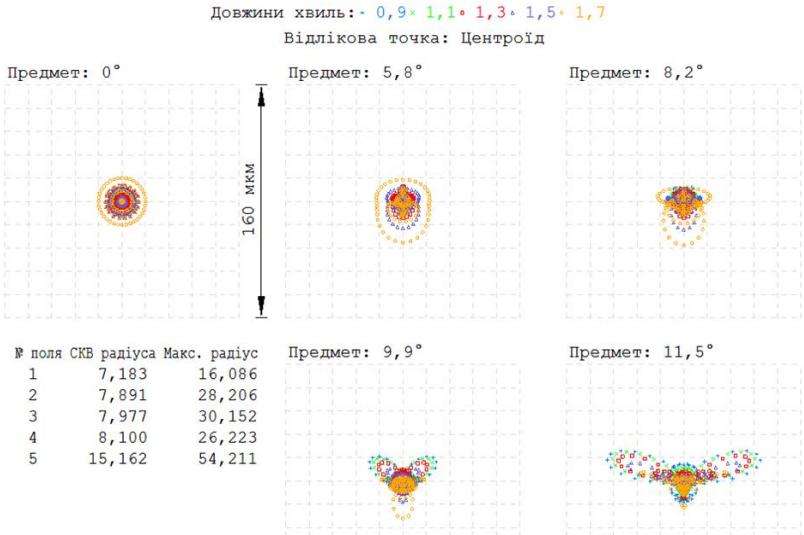


Рис. 2. Точкові діаграми розробленого об’єктива для SWIR-діапазону

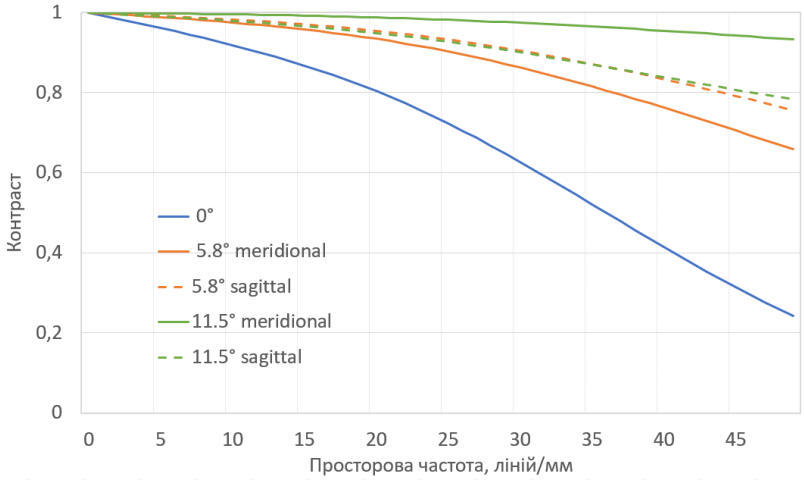


Рис. 3. Поліхроматичні модуляційні передавальні функції розробленого SWIR-об’єктива для різних точок поля зору

Представлені на рис. 3 графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій (МПФ) розробленого об’єктива для різних точок поля зору (в центрі, середній зоні та на периферії зображення) свідчать про якісну корекцію аберацій. Зокрема, значення поліхроматичних МПФ для просторової частоти 40 ліній/мм по всьому полю в меридіональному та сагітальному перетинах перевищують 40%.

Висновки

Шляхом комп'ютерного моделювання здійснено експериментальну перевірку дієздатності запропонованого автоматизованого методу розрахунку оптичних систем на прикладі розробки SWIR-об'єктива. Отримані результати свідчать, що розрахована оптична система за якістю зображення не поступається відому комерційному аналогу. Підтверджено, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші є потужним засобом, за допомогою якого можна результативним чином здійснювати параметричний синтез оптичних систем SWIR-об'єктивів з параметрами, що задовольнятимуть заданим конструктором вимогам.

Література

1. Птицын А. Что мы видим и что не видим? / А. Птицын // Фотоника. – 2015. – №. 3. – С. 142–151.
2. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII. International Society for Optics and Photonics, 2016. T. 9987. P. 99870C.
3. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
4. Eiben A., Smith J. Introduction to Evolutionary Computing; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
5. Haupt R., Haupt S. Practical Genetic Algorithms. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.
6. Сокуренко В. М. Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації / В. М. Сокуренко, В. С. Неділюк // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012. – № 1. – С. 81–88.
7. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 p. DOI 10.1155/2013/969734
8. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. Journal of Computers. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139-2145. DOI 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
9. Сокуренко В. М. Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації / В. М. Сокуренко, Я. І. Макаренко // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2015. – № 50(2) – С. 51–60.
10. Сокуренко В. М. Застосування адаптивного методу диференційної еволюції Коші для розрахунку об'єктивів / В. М. Сокуренко, І. С. Буйлов // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2016. – № 51(1) – С. 41–47.
11. Сокуренко В. М. Розробка об'єктивів з виправленою дисторсією / В. М. Сокуренко, О. Є. Стріха // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 99–105.
12. Сокуренко В. М. Автоматизований розрахунок окулярів з дифракційними оптичними елементами / В. М. Сокуренко, М. М. Вакуленко // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 1 (257). – С. 107–112.
13. Сокуренко В. М. Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива зі зменшеною дисторсією / В. М. Сокуренко, Д. П. Бондарчук // Вісник НТУУ "КПІ". – 2018. – № 56(2) – С. 18–24.
14. SWIR catalog 2018 [Електронний ресурс] // Optec S.P.A. company. – 2019. – Режим доступу : http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo_completo.pdf.

References

1. Pticyn A. Chto my vidim i chto ne vidim? / A. Pticyn // Fotonika. – 2015. – №. 3. – S. 142–151.
2. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII. International Society for Optics and Photonics, 2016. T. 9987. R. 99870C.
3. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
4. Eiben A., Smith J. Introduction to Evolutionary Computing; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
5. Haupt R., Haupt S. Practical Genetic Algorithms. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.
6. Sokurenko V. M. Chyslove doslidzhennia stokhastychnykh metodiv bezperervnoi hlobalnoi optymizatsii / V. M. Sokurenko, V. S. Nediliuk // Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». – 2012. – № 1. – S. 81–88.
7. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 pages. DOI 10.1155/2013/969734
8. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. Journal of Computers. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139-2145. DOI 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
9. Sokurenko V. M. Rozrobka optychnykh system metodamy hlobalnoi optymizatsii / V. M. Sokurenko, Ya. I. Makarenko // Visnyk NTUU "KPI". Seriia pryladobuduvannia. – 2015. – № 50(2) – S. 51–60.
10. Sokurenko V. M. Zastosuvannia adaptyvnoho metodu dyferentsiinoi evoliutsii Koshi dlia rozrakhunku obiektyviv / V. M. Sokurenko, I. S. Builov // Visnyk NTUU "KPI". Seriia pryladobuduvannia. – 2016. – № 51(1) – S. 41–47.
11. Sokurenko V. M. Rozrobka obiektyviv z vypravlenoiu dystorsiieiu / V. M. Sokurenko, O. Ye. Strikha // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2017. – № 1. – S. 99–105.
12. Sokurenko V. M. Avtomatyzovanyi rozrakhunok okuliariv z dyfraktsiinymy optychnymy elementamy / V. M. Sokurenko, M. M. Vakulenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi, 2018. – № 1 (257). – S. 107–112.
13. Sokurenko V. M. Avtomatyzovanyi parametrychnyi syntez fotoobiektyva zi zmenshenoiu dystorsiieiu / V. M. Sokurenko, D. P. Bondarchuk // Visnyk NTUU "KPI". Seriia pryladobuduvannia. – 2018. – № 56(2) – S. 18–24.
14. SWIR catalog 2018 [Elektronnyi resurs] // Optec S.P.A. company. – 2019. – Rezhym dostupu : http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo_completo.pdf.

Рецензія/Peer review : 14.12.2019 р. Надрукована/Printed : 16.01.2020
Рецензент: к.т.н., доц. Кучеренко О.К.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-206-210
УДК 681.7.067.324

В.М. СОКУРЕНКО, О.В. ТРОСТЯНСЬКА
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

СИНТЕЗ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКУЛЯРА ДЛЯ МІКРОДИСПЛЕЯ З ВИСОКОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ

В роботі здійснено автоматизований параметричний синтез оптичної системи шестилінзового окуляра за допомогою одного з алгоритмів глобальної оптимізації. Окуляр призначений для спостереження зображення з OLED мікродисплея, що функціонує у видимому спектральному діапазоні, має кількість пікселів 2048×2048 і розмір діагоналі випромінювальної площадки 1 дюйм. Безпосередній процес розрахунку оптичної системи здійснювався без активної участі конструктора. Представлені точкові діаграми та графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій свідчать про високу якість зображення оптичної системи синтезованого окуляра.

Ключові слова: окуляр, мікродисплей, OLED, оптична система, оптимізація, параметричний синтез.

V.M. SOKURENKO, O.V. TROSTIANSKA
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SYNTHESIS OF EYEPIECE OPTICAL SYSTEM FOR HIGH-RESOLUTION MICRODISPLAY

In previous years, microdisplays were mostly used as image sources for television systems, projectors, digital camera viewfinders, and helmet display systems. Today, different microdisplays have become widely applied in smart glasses, augmented and virtual reality systems, windshield imaging systems, medicine, military equipment, etc. Regardless of the technology involved, modern microdisplays require to use specialized optical components (like mirrors, prisms, or eyepieces) to provide the required magnification and comfortable viewing conditions. To perform optical design of the eyepiece system, the numerical technique based on one of novel differential evolution algorithms is proposed. Specifically, in this article, an automated parametric synthesis was fulfilled for a six-lens high-resolution optical system of an eyepiece with the long eye relief. The eyepiece is intended for viewing an image obtained from the OLED microdisplay which operates in the visible spectral range and has the pixel resolution of 2048×2048 and a 1-inch size of its diagonal. The process of computing the optical system was carried out automatically, i.e. without active involvement of the designer. The developed optical system of the eyepiece has the effective focal length 40,7 mm and the angular field of view 35°. It provides the long eye relief (equal to 50 mm) and low relative distortion (less than 2%). It can be used for the human eye pupil with diameter up to 7 mm. The presented image spot diagrams and modulation transfer function charts prove the high image quality of the designed optical system of the eyepiece. In particular, the polychromatic RMS spot radii do not exceed 11 μm over the full field, while the polychromatic modulation transfer function value for the axial beam at the spatial frequency 50 lines/mm is higher than 0.45.

Keywords: eyepiece, microdisplay, OLED, optical system, optimization, parametric synthesis.

Вступ

Мікродисплеї почали активно застосовуватись в промисловості в 90-х роках 20-го століття. Переважно вони використовувались як джерело зображення для телевізійних систем, проекторів, видошукачів для цифрових фотоапаратів та нашоломних систем відображення. В сучасних умовах мікродисплеї набули широкого вжитку в «розумних» окулярах, системах доповненої та віртуальної реальності, системах проектування зображення на лобове скло, медицині, військовій техніці тощо. Якісні зразки розглянутих приладів та систем потребують застосування мікродисплеїв з великою роздільною здатністю та високою якістю зображення, тому з кожним роком технологія їх виробництва постійно вдосконалюється [1, 4].

Сучасні мікродисплеї мають такі особливості [2–4]: забезпечують високу роздільну здатність; мають малий фізичний розмір (діагональ не більше 25 мм) та вагу; потребують малого енергоспоживання.

Незалежно від закладеної технології функціонування, сучасні мікродисплеї вимагають обов'язкового застосування додаткових оптичних систем (ОС) типу окулярів для забезпечення потрібного збільшення та комфортних умов спостереження зображення. Параметричному синтезу подібної ОС – лінзового окуляра – й присвячена дана робота.

Відомі методи розрахунку лінзових окулярів

Існують різні методи розрахунку ОС. Так, один з поширених «класичних» підходів зводиться до синтезу системи на базі теорії аберацій ОС 3-го та рідше 5-го порядків. Для багатокомпонентних систем визначаються основні монохроматичні та хроматичні аберраційні параметри тонких компонентів або компонентів зі значною товщиною [5]. Однак, розглянутий підхід дає якісні результати лише для ОС з помірними значеннями поля зору та відносного отвору.

Другий спосіб полягає у використанні компонентів (лінз) з відомими аберраційними властивостями відповідно до методики Русінова М. М. [6]. Проте такий метод потребує від розробника ОС значного досвіду та навіть інтуїції та абсолютно не гарантує отримання прийнятного результату.

Третій підхід ґрунтується на використанні локальної оптимізації до вже розроблених ОС, інформація про конструктивні параметри яких є доступною з різних каталогів ОС, опублікованих монографій, довідників, наукових статей або патентних джерел. Зрозуміло, що через особливості локальної оптимізації стартова ОС має бути наближеною до кінцевого розв'язку. Насамперед, це стосується багатоелементних ОС. Таким чином, на сьогодні відсутні аналітичні методи розрахунку окулярів. Незважаючи на те, що сьогодні багато відомих компаній займаються науково-технічною роботою щодо

розробки вдосконалених ОС для спостереження зображення з мікродисплеїв, стверджувати, що ця проблема повністю вирішена, не можливо.

Постановка задачі досліджень

Для розв'язання задачі параметричного синтезу ОС окуляра в даній статті пропонується чисельний метод розрахунку. Зокрема, в роботі здійснено перевірку дієздатності програмного засобу автоматизованого розрахунку, в основу якого покладено один з сучасних алгоритмів глобальної оптимізації. Мета такого підходу – повністю уникнути потреби в якісній стартовій ОС та виключити активну участь конструктора з процесу безпосереднього розрахунку.

Нижче буде показано, що використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення з проектування ОС, можна здійснювати автоматизований пошук конструктивних параметрів ОС окулярів з високою роздільною здатністю, з урахуванням заданих конструктором функціональних параметрів та конструктивних обмежень. Зокрема, в даній статті буде представлено методику та результати автоматизованого синтезу ОС багатолінзового окуляра для сучасного мікродисплея з великою роздільною здатністю.

Сучасні моделі мікродисплеїв з високою роздільною здатністю

З кожним днем галузь виробництва мікродисплеїв розвивається та набуває нових технологій. На сьогоднішній день розробкою мікродисплеїв займається значна кількість компаній, адже такі пристрої все частіше з'являються в нашому повсякденному житті. Тому область досліджень, присвячених розробці різних технологій для мікродисплеїв, є наразі на затребуваною та такою, що швидко розвивається.

На рис. 1 представлені сучасні комерційні зразки мікродисплеїв з високою роздільною здатністю, розроблені провідними світовими компаніями. Табл. 1 містить основні функціональні параметри розглянутих мікродисплеїв, які потрібно враховувати під час розрахунку ОС окулярів.

а *б* *в*

Рис. 1. Мікродисплеї різних виробників [7–9]: *а*) Kopin, *б*) Olightech, *в*) Zacuto

Таблиця 1

Основні функціональні параметри мікродисплеїв різних виробників

Параметр	KOPIN The lightning 2K OLED	HOLOEYE 4K Resolution-Monochrome	Olightech SXGA 060	Zacuto Gratical HD EVF
Розмір діагоналі	0,99"	0,7"	0,6"	0,61"
Роздільна здатність	2048×2048	4094×2464	1280×1024	1280×1024
Кількість пікселів	4,1 МП	10 МП	1,3 МП	1,3 МП
Розмір пікселя	0,008 мм	0,003 мм	0,009 мм	0,009 мм
Формат кадру	1:1	1,66:1	5:4	16:9

Чисельний розрахунок окуляра

В даній роботі було здійснено розрахунок ОС шестилінзового окуляра для мікродисплея з розміром діагоналі 1", який призначений для роботи в видимому спектральному діапазоні 0,47…0,65 мкм. Параметри подібного мікродисплея представлені в другому стовпці табл. 1.

Розрахунок ОС проводився за допомогою розробленого програмного забезпечення «PODIL» з використанням вбудованих в нього алгоритмів глобальної оптимізації.

Оскільки ОС окуляра належить до систем типу «1-0», що мають площину предметів на кінцевій відстані, а площину зображень – в нескінченності, її традиційно розраховують в зворотному ході променів.

При чисельному моделюванні вихідними даними до розрахунку були встановлені такі параметри:

– спектральний діапазон – видимий (0,47…0,65 мкм);

– кутове поле зору в просторі предметів – 35 градусів;

– задня фокусна відстань – 40,7 мм (разом з заданим кутом поля зору вона визначає розмір діагоналі лінійного зображення $2y'$ =25,6 мм);

– діаметр вхідної зіниці – 7 мм (в даній ОС вхідна зіниця є одночасно й апертурною діафрагмою);

– віддалення зіниці від зовнішньої поверхні окуляра – 50 мм;

– кількість лінз – 6.

Перед запуском процедури параметричного абераційного синтезу було введено такі обмеження:

– діапазон допустимих осьових товщин лінз – 3…7 мм;

– діапазон допустимих осьових повітряних проміжків – 0,1…3 мм;

– діапазон кривизни оптичних поверхонь – (-0,05…0,05) мм;

– мінімальна товщина лінз по краю – 1,5 мм;

– мінімальна товщина повітряних проміжків краю – 1 мм;

– максимальне значення відносної дисторсії по полю для основної довжини хвилі – 2%.

Контроль фокусної відстані здійснювався заданим регулятором – кутом апертурного променя на виході системи. Зокрема, при заданому діаметрі вхідної зіниці (7 мм) тангенс кута дорівнював -0,086.

Стартова ОС була задана практично у формі плоско-паралельних пластин (рис. 2).

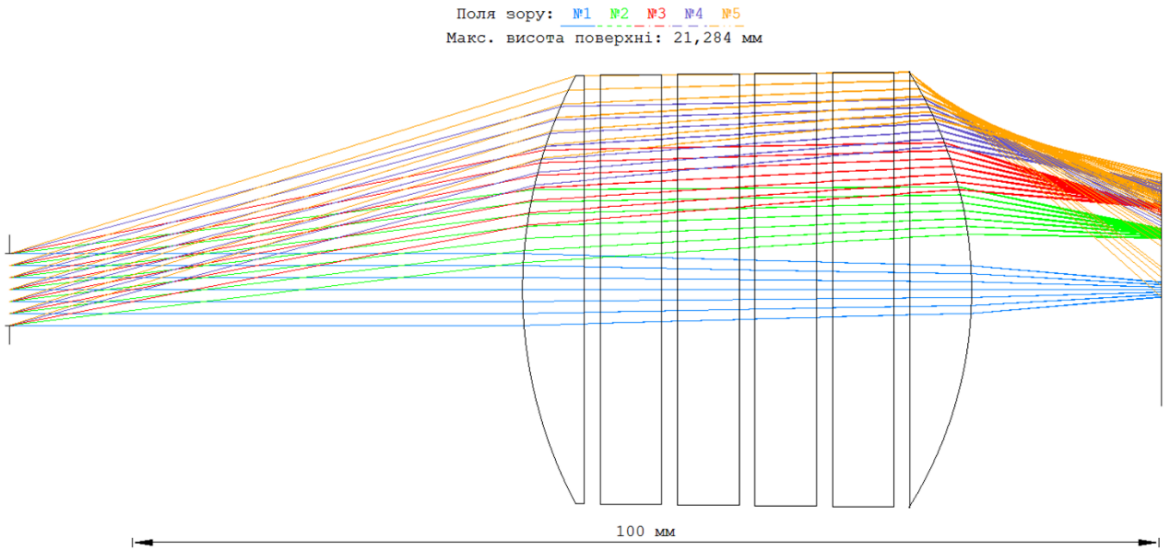


Рис. 2. Початкова оптична система з плоско-паралельних пластинок

З метою скорочення часу, потрібного для параметричного синтезу, увесь процес розрахунку проводився в два етапи. На першому етапі встановлювалася оціночна функція для мінімізації функції деформації хвильового фронту з пошуком найкращих марок скла. При цьому алгоритмом глобальної оптимізації досліджувався увесь заданий багатовимірний простір пошукових з розміром популяції 100 на кожну змінну. Така процедура потребувала декількох годин роботи програми.

На другому (завершальному) етапі оціночна функція складалася вже для поліпшення значень поліхроматичної модуляційної передавальної функції для різних точок поля зору та просторової частоти 50 ліній/мм. Під час цього розрахунку розмір популяції був зменшений до 30. Результати отриманої системи представлені на рис. 3.

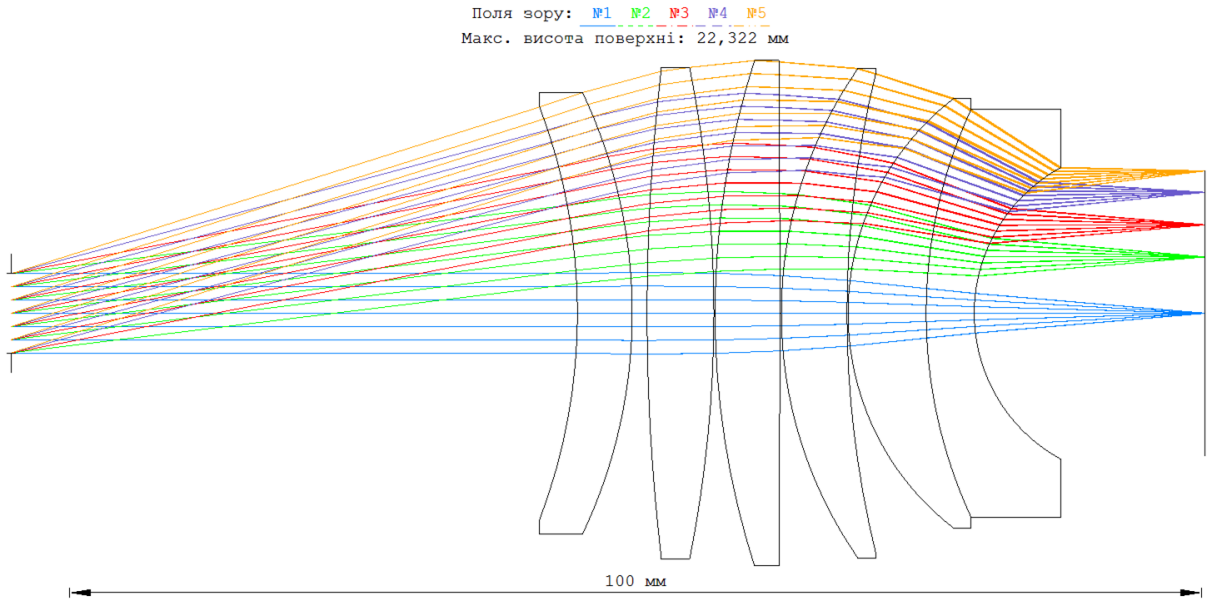


Рис. 3. Оптична схема розрахованого окуляра з ходом осьових та позаосьових променів

Якість зображення отриманої ОС можна оцінити за точковими діаграмами, показаними на рис. 4, та графіками поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, приведеними на рис. 5 для різних точок поля зору.

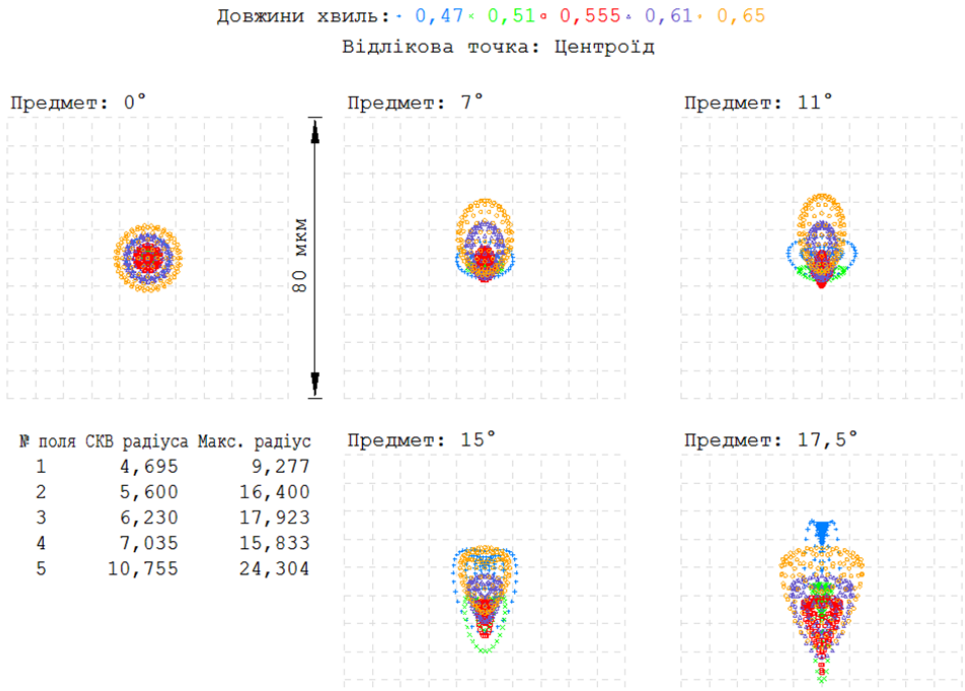


Рис. 4. Точкові діаграми синтезованого окуляра

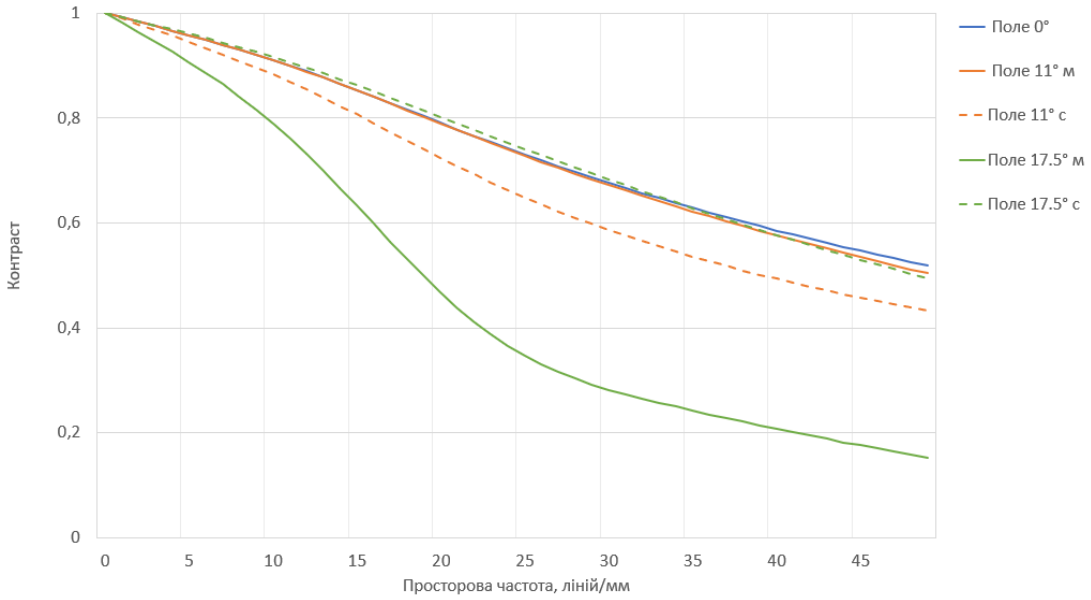


Рис. 5. Графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій розробленого окуляра для різних точок поля зору: суцільні криві – для меридіональної площини; пунктирні – для сагітальної

Висновки

Приведений параметричний синтез оптичної системи шестилінзового окуляра для мікродисплея з високим просторовим розділенням підтверджує на практиці можливість здійснення автоматизованому розрахунку за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, призначеного для проектування оптичних систем з урахуванням заданих функціональних параметрів та конструктивних обмежень. Отримані результати свідчать, що синтезована оптична система окуляра має високу якість зображення. Перевагами розрахованого окуляра є суттєве кутове поле зору (35º), незначна дисторсія (не більше 2%) та велике віддалення зіниці (50 мм).

Література

1. Haas G. Microdisplays for Augmented and Virtual Reality. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2018. Vol. 49. No. 1, p. 506–509.

2. Underwood I. A review of microdisplay technologies. SID Seminar Notes. 2000.

3. Armitage D., Underwood I., Shin-Tson Wu. Introduction to Microdisplays. Wiley Series in Display Technology. 2006. 396 p.

4. Templier F. OLED Microdisplays: Technology and Applications. Wiley-ISTE. 2014. 286 p.

5. Слюсарев, Г.Г. Методы расчета оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л. : Машиностроение, 1969. – 672 с. : ил.

6. Русинов М.М. Композиция оптических систем / Русинов М.М. – Л. |: Ленинградское отделение, 1989. – 383 с. : ил.

7. Kopin Unveils 'Lightning' 2k × 2k 120Hz OLED Microdisplay for Mobile VR. Kopin. 2019. URL: https://www.roadtovr.com/kopin-unveils-lightning-2k-x-2k-120hz-oled-microdisplay-mobile-vr/.

8. Yunnan OLiGHTEK Opto-Electronic Technology Products. OLiGHTEK. 2019. URL: http://www.olightek.com/product.html.

9. Zacuto Gratical HD EVF. Zacuto. 2019. URL: http://www.olightek.com/product.html.

Reerences

1. Haas G. Microdisplays for Augmented and Virtual Reality. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2018. Vol. 49. No. 1, p. 506–509.

2. Underwood I. A review of microdisplay technologies. SID Seminar Notes. 2000.

3. Armitage D., Underwood I., Shin-Tson Wu. Introduction to Microdisplays. Wiley Series in Display Technology. 2006. 396 p.

4. Templier F. OLED Microdisplays: Technology and Applications. Wiley-ISTE. 2014. 286 p.

5. Slyusarev, G.G. Metody rascheta opticheskih sistem / G.G. Slyusarev. – Izd. 2-e, dop. i pererab. – L. : Mashinostroenie, 1969. – 672 s. : il.

6. Rusinov M.M. Kompoziciya opticheskih sistem / Rusinov M.M. – L. |: Leningradskoe otdelenie, 1989. – 383 s. : il.

7. Kopin Unveils 'Lightning' 2k × 2k 120Hz OLED Microdisplay for Mobile VR. Kopin. 2019. URL: https://www.roadtovr.com/kopin-unveils-lightning-2k-x-2k-120hz-oled-microdisplay-mobile-vr/.

8. Yunnan OLiGHTEK Opto-Electronic Technology Products. OLiGHTEK. 2019. URL: http://www.olightek.com/product.html.

9. Zacuto Gratical HD EVF. Zacuto. 2019. URL: http://www.olightek.com/product.html.

Рецензія/Peer review : 14.12.2019 р. Надрукована/Printed : 16.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Боровицький В.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-211-221
УДК 621.396.12

В.Т. КОНДРАТОВ
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО.

Часть 9. Магнитполевые измерители удельной электропроводности полупроводниковых материалов

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой теории и методов измерений физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал.. В статье изложена сущность методов косвенных измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов. Описаны схемотехнические решения магнитополевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов. Установлено три разновидности магнитополевых методов измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов: метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия); метод, использующий пространственное инвертирование волновода и организацию движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений); метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В последнем случае используется поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на левый и правый плоские контура волновода. Показана возможность измерения не только удельной электропроводности, но и других физических величин, характеризующие исследуемый материал: плотность тока в контуре волновода, объем материала волновода, количество электронов в этом объеме, а также число электронов в $1\,\text{м}^3$ *этого материала. Базовыми функциональными элементами магнитополевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов являются: генератор «пачек» импульсов высокой частоты, обеспечивающий получение соленоидального импульсного магнитного поля той же частоты, а также плоский двухконтурный волновод, выполненный из исследуемого материала. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитополевые методы и средства измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов.*

Ключевые слова: магнитополевые методы, измерение, удельная электропроводность материалов.

V.T. KONDRATOV
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Science of Ukraine

FUNDAMENTAL METROLOGY. THE MAGNETIC–FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE THE PHENOMENON OF TRANSFER OF ENERGY AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE PART 9. MAGNETIC-FIELD ELECTRICAL CONDUCTIVITY METERS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

This article is a further development of the magnetic-field theory and methods for measuring physical quantities based on the phenomenon of energy and information transfer through the material. The article describes the essence of indirect methods for measuring the electrical conductivity of semiconductor materials. Circuitry solutions of magnetic-field conductivity meters of semiconductor materials are described. Three types of magnetic-field methods for measuring the electrical conductivity of semiconductor materials have been established: a method that uses spatial inversion of a waveguide (rotate it 180° along the large (longitudinal) axis of symmetry) and organize the movement of electrons only clockwise (unidirectional exposure process); a method that uses spatial inversion of the waveguide and the organization of the movement of electrons both clockwise and counter clockwise (bidirectional exposure process, providing doubled measurement accuracy); a method that uses the organization of the movement of electrons clockwise and counter clockwise (a bi-directional process of exposure, but without spatial inversion of the waveguide. In the latter case, the alternating action of the high frequency solenoidal pulsed magnetic field on the left and right flat waveguide contours is used. The possibility of measuring not only electrical conductivity, but also other physical quantities characterizing the material under study: current density in the waveguide circuit, volume of the waveguide material, the number of electrons in this volume, and the number of electrons in $1\,m^3$ *this material is shown. The basic functional elements of magnetic field conductivity meters of semiconductor materials are: a generator of "bundles" of high-frequency pulses, providing a solenoidal pulsed magnetic field of the same frequency, as well as a two-loop flat waveguide made of the material under study. The described circuit solutions of the conductivity meters of semiconductor materials expand our understanding and knowledge of the newest direction in metrology – magnetic-field methods and measuring instruments. The work is of interest to metrologists, specialists, masters and graduate students studying magnetic field methods and means of measuring the electrical conductivity of semiconductor materials.*

Keywords: magnetic-field methods, measurement, electrical conductivity of materials.

По-прежнему актуальной является задача разработки и описания особенностей работы и функциональных возможностей схемотехнических решений магнитополевых измерителей (МПИ) удельной электропроводности (УЭП) полупроводниковых материалов.

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой (МП) теории измерений (ТИ) в части измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов.

В работе описаны результаты решения технической задачи создания МПИ УЭП полупроводниковых материалов (собственно полупроводников, полупроводников *n*-типа и *p*-типа),

реализующих новейший физический принцип измерений, основанный на явлении переноса энергии и информации сквозь материал (см. [1, 2]). При этом МПИ УЭП должны иметь достаточно высокую точность измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов в заданном частотном и температурном диапазонах, иметь расширенные функциональные возможности в части определения значений не только удельной электропроводности полупроводниковых, но и проводниковых и диэлектрических материалов, плотности тока переноса, количества электронов в исследуемом материале, напряженности электрического поля в материале, длины свободного пробега электронов, а также прогнозировать наличие в материале волновода примесей донорного или рецепторного типа. При этом ограничениями для измерений может быть только невозможность изготовления волновода заданной конфигурации и размеров из исследуемого образца материала.

Объектом исследований являются магнитополевые методы и средства измерений физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал.

Предметом исследований являются магнитополевые методы и средства измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов.

Результаты исследований

Рассмотрим сущность магнитополевого метода измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов, а затем работу трех вариантов магнитополевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов, реализующих этот метод.

1. *Магнитополевой метод определения удельной электропроводности полупроводниковых материалов*

Магнитополевой метод определения удельной электропроводности полупроводниковых материалов реализуется при наличии механической системы замкнутого типа, которая включает в себя плоский двухконтурный волновод, изготовленный из исследуемого материала, нескольких катушек индуктивности, размещенных соосно и перпендикулярно первому и второму контурам плоского двухконтурного волновода соответственно, а также четное количество ферритовых броневых сердечников, используемые для размещения в них катушек индуктивности и для экранирования их от действия внешних магнитных полей и помех.

В зависимости от вида исследуемого материала волновода, обозначим физические величины (напряжения, токи, энергии и т.д.) с нижними индексами: «*m*» (металл), «g» (собственный полупроводник), «*n*» (полупроводник *n*-типа), «*p*» (полупроводник *p*-типа) и «*d*» (диэлектрик).

В соответствие с физическим принципом измерений, выполняются следующие физические операции (действия) описываемого метода измерений. Вначале формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой или сверхвысокой частоты с энергией магнитного поля: $W_{om} = L_0 I_{om}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности металлов); $W_{og} = L_0 I_{og}^2 / k_2$, – при измерении удельной электропроводности собственных полупроводников; $W_{on} = L_0 I_{on}^2 / k_2$, – при измерении удельной электропроводности полупроводников *n*-типа; $W_{op} = L_0 I_{op}^2 / k_2$, – при измерении удельной электропроводности полупроводников *p*-типа; $W_{od} = L_0 I_{od}^2 / k_2$, – при измерении удельной электропроводности диэлектриков, где $I_{ом}$, I_{og}, I_{on}, I_{op} і I_{od} – соответствующие максимальные импульсные значения тока через катушку индуктивности L_0; $k_2 = 2$. В течение нечетных полупериодов низкой частоты коммутации, соленоидальным импульсным магнитным полем высокой частоты воздействуют на электроны материала первого контура плоского волновода, причем под прямым углом к его поверхности. В результате возникают принудительные колебания (движение) электронов в материале и движение их по замкнутому контуру плоского двухконтурного волновода, например, слева на право или справа на лево.

Совершая продольные колеблясь под действием импульсного магнитного поля высокой частоты, электроны генерируют продольную электромагнитную волну. Высокочастотная электромагнитная волна, возникшая в материале левого высокочастотного колебательного контура, передается в правый высокочастотный колебательный контур по однопроводной линии связи. Благодаря движению слева направо (от точки «1» до точки «2» траектории) по замкнутому кругу плоского двухконтурного волновода, электроны совершают определенную работу. Тем самым устанавливается связь между координатами и скоростями в двух разных точках «1» и «2» траектории движения этих электронов.

Высокочастотные колебания, возбужденные в левом и правом высокочастотных колебательных контурах поочередно, трансформируются в высокочастотные напряжения $u_o(t)$ и $u_x^{\pm}(t)$ на выходах левой и выходных катушек индуктивности. Указанные высокочастотные напряжения выпрямляются, сглаживаются (фильтруются) и измеряются, Полученные значения напряжений U_o и $U_x^{\pm}$ запоминаются.

Следует отметить, что в зависимости от вида и типа исследуемого материала волновода (металла, собственного полупроводника, полупроводника *n*-типа или *p*-типа или диэлектрика) выбирается и соответствующая напряженность соленоидального импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты. Нормированные по значению напряжения обозначим следующим образом: U_{om}, U_{og}, U_{on}, U_{op} и U_{od}.

По значениям напряжений U_{om}, U_{og}, U_{on}, U_{op} и U_{od} судят о действующем значении априори заданного (сверх) высокочастотного тока, текущего в контуре левой катушки индуктивности, а по значениям напряжений $U_x^{\pm}$ судят как о токе $I_x^{\pm}$, текущем по контуру волновода за счет движения электронов в прямом направлении — слева на право (знак «+») или в обратном — справа на лево (знак «–»), так и о электропроводности материала и о количестве электронов, которые навели электродвижущую силу.

Одновременно измеряются действующие значения тока I_x в прямом и обратном направлениях ($I_{x\text{м}}^{+}$ и $I_{x\text{м}}^{-}$, I_{xg}^{+} и I_{xg}^{-}, I_{xn}^{+} и I_{xn}^{-}, I_{xp}^{+} и I_{xp}^{-}, I_{xd}^{+} и I_{xd}^{-}), обусловленного движением электронов внутри замкнутого контура волновода, причем в месте их наибольшей плотности, то есть в месте соединения двух контуров плоского волновода проводниками, нормированными по значению площади сечения ΔS_{o}.

После этого определяется средняя длина $\overline{l_e}$ свободного пробега электронов по уравнению величин

$$\overline{l_{ex}} = b_x / k_2 \text{ [м]}, \tag{1}$$

где b_x – период кристаллической решётки материала, из которого изготовлен волновод; $k_2 = 2$.

Для указанных выше материалов имеют место следующие соотношения: $\overline{l_{em}} = b_m / k_2$ [м], $\overline{l_{eg}} = b_g / k_2$ [м], $\overline{l_{en}} = b_n / k_2$ [м], $\overline{l_{ep}} = b_p / k_2$ [м] , $\overline{l_{ed}} = b_d / k_2$ [м].

Об удельной электропроводности исследуемого материала, в случае движения электронов слева на право (по часовой стрелке – прямое направление движения, – «+») и справа на лево (против часовой стрелки – обратное направление движения – «–») судят по определенным уравнениям величин:

А. Для металлических волноводов (при $\{\overline{l_e}\} = \{\overline{l_{em}}\}$, токах проводимости $I_{x\text{м}}^{+}$, $I_{x\text{м}}^{-}$ и напряжениях $U_{x\text{м}}^{+}$, $U_{x\text{м}}^{-}$) удельная электропроводность определяется согласно уравнениям величин

$$\sigma_{xm}^{+} = \frac{I_{xm}^{+}}{U_{xm}^{+}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{em}}}} \text{ См/м}, \tag{2}$$

$$\sigma_{xm}^{-} = \frac{I_{xm}^{-}}{U_{xm}^{-}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{em}}}} \text{ См/м}. \tag{3}$$

В случаях, когда волновод выполнен из чистого металла, разница значений удельной электропроводности, полученных согласно уравнениям величин (2) и (3), равна нулю, т.е. $\{\sigma_{xm}^{+}\} - \{\sigma_{xm}^{-}\} = 0$. Если $\{\sigma_{xm}^{+}\} - \{\sigma_{xm}^{-}\} > 0$, то материал волновода имеет примеси *n*-типа, а при $\{\sigma_{xm}^{+}\} - \{\sigma_{xm}^{-}\} < 0$ — *p*-типа.

Б. Для волноводов, выполненных из собственного полупроводника (то есть из химически чистого кристаллического полупроводника без примесей) при $\{\overline{l_e}\} = \{\overline{l_{eg}}\}$, токах I_{xg}^{+}, I_{xg}^{-}, и напряжениях U_{xg}^{+} и U_{xg}^{-} обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин:

$$\sigma_{xg}^{+} = \frac{I_{xg}^{+}}{U_{xg}^{+}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{eg}}}} \text{ См/м}, \tag{4}$$

$$\sigma_{xg}^{-} = \frac{I_{xg}^{-}}{U_{xg}^{-}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{eg}}}} \text{ См/м}. \tag{5}$$

Если материалом волновода является химически не чистый полупроводник, то, при $\{\sigma_{xg}^{+}\} - \{\sigma_{xg}^{-}\} > 0$, материал содержит донорную примесь, а при $\{\sigma_{xg}^{+}\} - \{\sigma_{xg}^{-}\} < 0$ — рецепторную.

В. Для волноводов, выполненных из полупроводника *n*-типа (то есть с электронным типом проводимости) при $\{\overline{l_e}\} = \{\overline{l_{en}}\}$, токах I_{xn}^{+}, I_{xn}^{-} и напряжениях U_{xn}^{+} и U_{xn}^{-} обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин:

$$\sigma_{xn}^{+} = \frac{I_{xn}^{+}}{U_{xn}^{+}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{en}}}} \text{ См/м}, \tag{6}$$

$$\sigma_{xn}^{-} = \frac{I_{xn}^{-}}{U_{xn}^{-}} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{en}}}} \text{ См/м}. \tag{7}$$

Если материалом волновода является полупроводник *n*-типа, то при $\{\sigma_{xn}^{+}\} - \{\sigma_{xn}^{-}\} > 0$ материал также содержит донорные примеси, а при $\{\sigma_{xn}^{+}\} - \{\sigma_{xn}^{-}\} < 0$ – рецепторные примеси;

г) для полупроводников *p*-типа (с дырочной проводимостью), при $\{\overline{l_e}\}=\{\overline{l_{ep}}\}$, токах I_{xp}^{+}, I_{xp}^{-} и напряжениях U_{xp}^{+} і U_{xp}^{-}, обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется согласно уравнениям величин:

$$\sigma_{xp}^{+}=\frac{I_{xp}^{+}}{U_{xp}^{+}}\cdot\frac{1}{\overline{\overline{l_{ep}}}}\ \text{См/м}, \tag{8}$$

$$\sigma_{xp}^{-}=\frac{I_{xp}^{-}}{U_{xp}^{-}}\cdot\frac{1}{\overline{\overline{l_{ep}}}}\ \text{См/м}. \tag{9}$$

В случае, когда материалом волновода является полупроводник *p*-типа, то, при $\{\sigma_{xp}^{+}\}-\{\sigma_{xp}^{-}\}>0$, он содержит рецепторную примесь, а при $\{\sigma_{xp}^{+}\}-\{\sigma_{xp}^{-}\}<0$ — донорную примесь;

д) для диэлектриков, при $\{\overline{l_e}\}=\{\overline{l_{ed}}\}$, токах I_{xd}^{+}, I_{xd}^{-}, и напряжениях U_{xd}^{+} и U_{xd}^{-}, обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин

$$\sigma_{xd}^{+}=\frac{I_{xd}^{+}}{U_{xd}^{+}}\cdot\frac{1}{\overline{\overline{l_{ed}}}}\ \text{См/м} \tag{10}$$

и

$$\sigma_{xd}^{-}=\frac{I_{xd}^{-}}{U_{xd}^{-}}\cdot\frac{1}{\overline{\overline{l_{ed}}}}\ \text{См/м}. \tag{11}$$

В тех случаях, когда волновод выполнен из диэлектрика и $\{\sigma_{xd}^{+}\}-\{\sigma_{xd}^{-}\}=0$, материал волновода примесей не содержит. При $\{\sigma_{xd}^{+}\}-\{\sigma_{xd}^{-}\}>0$ материал волновода содержит донорные примеси, а при $\{\sigma_{xd}^{+}\}-\{\sigma_{xd}^{-}\}<0$ – рецепторные примеси.

Описанный магнитополевой метод обеспечивает также определение плотности тока, количества электронов в $1\,\text{м}^3$ исследуемого материала и зависимость удельной электропроводности от температуры материала волновода, то есть $\sigma_x^{+}(T_x)$ и $\sigma_x^{-}(T_x)$.

О плотности тока судят по уравнению величин

$$J_x=\frac{I_x}{\Delta S_0}\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right], \tag{12}$$

где ΔS_0 — априори заданная площадь поперечного сечения плоского двухконтурного волновода (в месте разрыва цепи) или площадь сечения проводников, с помощью которых подключается измеритель тока (например $\Delta S_0=1\,\text{мм}^2=1\cdot10^{-4}\,\text{м}^2$).

О количестве электронов в $1\,\text{м}^3$ исследуемом материале судят по уравнению величин

$$N_e=\frac{I_x V_0}{q_e V_x}\left[\frac{\text{А}\cdot\text{м}^3}{\text{К}\cdot\text{м}^3}\right]=\frac{I_x}{q_e}\left[\frac{\text{А}}{\text{К}}\right], \tag{13}$$

где V_x – априори вычисленный объём материала волновода, м^3; $V_0=1\,\text{м}^3$ – (нормированный) объём материала волновода в СИ.

При вычислениях плотности тока и количества электронов по уравнениям величин (10) и (11) учитываются действующие значения тока I_x, текущего в прямом и обратном направлениях: $I_{x\text{м}}^{+}$ и $I_{x\text{м}}^{-}$, I_{xn}^{+} и I_{xn}^{-}, I_{xp}^{+} и I_{xp}^{-}, I_{xd}^{+} и I_{xd}^{-} того или иного материала.

Необходимо различать три разновидности магнитополевого метода измерения удельной электропроводности материалов:

1-й метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия). В этом методе осуществляется однотактное измерение зависимостей $U_x^{+}(T_x)$, $I_x^{+}(T_x)$, $\sigma_x^{+}(T_x)$, $J_x^{+}(T_x)$, $U_0^{+}(T_x)$ и $N_e^{+}(T_x)$ — при исходном положении волновода, и зависимостей $U_x^{-}(T_x)$, $I_x^{-}(T_x)$, $\sigma_x^{-}(T_x)$, $J_x^{-}(T_x)$, $U_0^{-}(T_x)$ и $N_e^{-}(T_x)$ — при пространственно инвертированном положении волновода вдоль своей большой оси. При определении температурных характеристик в обоих случаях используется электрический нагрев волновода;

2-й метод основан на пространственном инвертировании волновода и организации движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений). В данном методе проводятся двухтактные измерения: а) в первом такте – физических величин U_x^+, I_x^+, σ_x^+, J_x^+, U_0^+ и N_e^+ при заданном (нормированном) значении температуры T_0 и исходном положении волновода; б) во втором такте – физических величин U_x^-, I_x^-, σ_x^-, J_x^-, U_0^- и N_e^-, причем все измерения проводятся при нормальной температуре T_0, пространственно ивертированном положении волновода и без его электрического нагрева;

3-й метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки, — двунаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В этом методе используются поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на левый и правый плоские контура волновода, а также двухтактные измерения физических величин, — без пространственного инвертирования положения волновода и без искусственного нагрева волновода.

Указанные магнитополевые методы измерения реализуются тремя различными комбинированными схемами (вариантами) магнитополевых измерителей удельной электропроводности материалов,

2. *Магнитополевые измерители удельной электропроводности полупроводниковых материалов*

Рассмотрим три варианта схемотехнических решения МПИ УЭП и их особенности. Следует отметить, что от выбора материала для исследований определяются и значения тех входных параметров, которые априори записываются в память микроконвертора. В общем случае определяются значения таких величин, как: U_0, b_x или $\overline{l_e}$, ΔS_0, температурный диапазон нагрева материалов – $T_0,...,T_k$ с шагом, например, 5 градусов ($\Delta T = 5\,^oC$), и геометрические параметры волновода (толщина Δh, площадь S и объем V).

Вариант 1

На рис. 1 приведена комбинированная схема цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов, где введены следующие обозначения: КИП1 и КИП2 — первый и второй кодоуправляемые источники питания; А – амперметр; В — вольтметр; ПТК — преобразователь «ток-код»; СТ — сенсор температуры; ЦИТ — цифровой измеритель температуры (преобразователь «температура-код»; МК — микроконвертор; ЦОУ — цифровое отсчетное устройство; КЛ — клавиатура; Тг — триггер; *VT*1 и *VT*2 — первый и второй транзисторы; КР — кварцевый резонатор; *R*1 и *R*2 — первый и второй резисторы; *C*1 и *C*2 — первый и второй конденсаторы; ДВ1 и ДВ2 — первый и второй двухполупериодные выпрямители; *WG* — плоский двухконтурный волновод; *L*1, *L*2 і *L*3, *L*4 — первая, вторая, третья и четвёртая катушки индуктивности, расположенные на первом и втором цилиндрических каркасах (на рис. 1 не показано) соответственно; *L*5 и *L*6 — первый и второй контуры волновода; БС1 и БС2 — первый и второй ферритовые броневые сердечники; ОШ — общая шина.

При исследовании, например, полупроводников *n*-типа, в память микроконвертора вводятся значения следующих величин: U_{on}, $\overline{l_{en}}$, ΔS_0, $T_0,...,T_k$ $\Delta T = 5\,^oC$, Δh_n, S_n и V_n.

После включения питания, по заданной программе, записанной в память микроконвертора МК, на цифровые входы кодоуправляемого источника питания КИП из порта *P*2 через общую шину ОШ поступает цифровой сигнал, при котором на первом выходе КИП1 формируется напряжение питания, подаваемое через катушку индуктивности *L*2 на коллектор первого транзистора *VT*1. При этом коллектор второго транзистора *VT*2 соединён с его базой (диодное включение транзистора 13).

После включения питания начинает работать генератор сигнала (сверх)высокой частоты, выполненный на элементах *VT*1, *VT*2, *WQ*, *R*1, *R*2, *C*1 и *C*2 (рис. 1). Для формирования пачек высокочастотных импульс типа меандр, на базы транзисторов *VT*1 и *VT*2 с парафазных выходов триггера Тг поступают сигналы низкой частоты коммутации (также типа меандр) (см. рис. 1).

При этом на счетный вход триггера Тг поступает входной сигнал низкой частоты с выхода порта *P*0 микроконвертора МК, задаваемый по определенной программе. В результате на материал контура *L*5 волновода *WG* в отрицательные полупериоды частоты коммутации начинает воздействовать соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты.

На диаметрально противоположные контакты волновода *WG* подается напряжение с выходов «1» и «2» кодоуправляемого источника питания КИП2. Электрически ток априори заданного значения протекает через волновод *WG* и нагревает его до заданной температуры T_x. Контроль значений напряжения и тока через волновод *WG* осуществляется с помощью амперметра А и вольтметра В (рис. 1). Контроль температуры нагрева T_x осуществляется с помощью цифрового измерителя температуры ЦИТ с встроенным сенсором температуры СТ.

В результате действия температуры и соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты, свободные электроны материала контура *L5* волновода *WG* начинают двигаться по его замкнутому контуру, состоящему из параллельно включенных плоских контуров *L*5 и *L5*. В замкнутом конуре волновода *WG* возникает высокочастотный ток переноса $i_{x\text{п}}(t)$.

На выходах первого и второго двухполупериодного выпрямителей ДВ1 и ДВ2 появляются напряжения $U_{on}^{+}(T_x)$ и $U_{xn}^{+}(T_x)$, зависящие от вида материала и температуры волновода *WG*. Эти напряжения поочередно, по априори заданной программе поступают, через коммутатор каналов, на встроенный в микроконвертор МК аналого-цифровой преобразователь. Указанные напряжения преобразуются в соответствующие коды чисел и запоминаются в оперативной памяти МК.

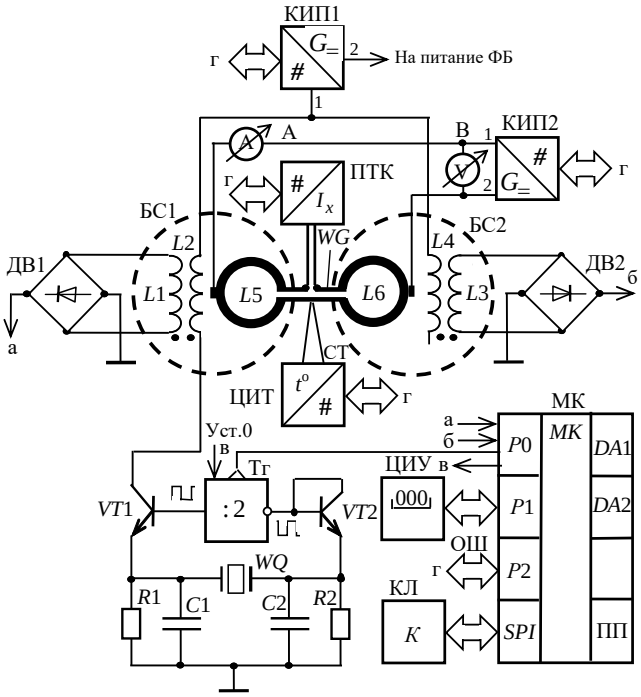


Рис. 1. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 1)

Высокочастотный ток переноса с помощью преобразователя «ток-код» ПТК преобразуется в действующее значение тока I_{xn}^{+} и в соответствующий код числа $N_{I_{xn}}^{+}$. Последний через общую шину ОШ и цифровые входы-выходы порта *P*2, поступает в оперативную память микроконвертора МК. Далее устанавливается новое значение температуры нагрева волновода *WG* в пределах заданного диапазона значений температур $T_0,..., T_k$. Процесс измерения повторяется аналогичным образом, например, *N* раз.

После окончания указанных измерений осуществляется пространственное инвертирование положения волновода *WG* вдоль своей большой оси (поворот на 180°). Указаггая выше последовательность измерений повторяется аналогичным образом *N* раз при заданных дискретных значениях температуры нагрева T_x. Полученные результаты поступают в оперативную память микроконвертора МК и обрабатываются. Так, например, зависимость удельной электропроводности исследуемого полупроводника *n*-типа определяется по уравнениям величин (6) и (7), (12) и (13) при различных значениях температур как при прямом, так и при обратном движении электронов:

$$\sigma_{xn}^{+}(T_x) = \frac{I_{xn}^{+}(T_x)}{U_{xn}^{+}(T_x)} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{en}}}} \text{ См/м}, \tag{14}$$

$$\sigma_{xn}^{-}(T_x) = \frac{I_{xn}^{-}(T_x)}{U_{xn}^{-}(T_x)} \cdot \frac{1}{\overline{\overline{l_{en}}}} \text{ См/м}. \tag{15}$$

Причем, для каждого значения температуры определяется разность значений удельной электропроводности материала, которую сравнивают с нулем. При

$$\{\sigma_{xn}^{+}(T_x)\} - \{\sigma_{xn}^{-}(T_x)\} > 0 \tag{16}$$

материал волновода содержит донорную примесь, а при

$$\{\sigma_{xn}^{+}(T_x)\} - \{\sigma_{xn}^{-}(T_x)\} < 0 \tag{17}$$

— рецепторную.

Дополнительно определяется плотность тока

$$J_x^+(T_x) = \frac{I_x^+(T_x)}{\Delta S_o}\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right], \tag{18}$$

$$J_x^-(T_x) = \frac{I_x^-(T_x)}{\Delta S_o}\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right], \tag{19}$$

и, с учетом уравнения величин (13), зависимость

$$\lg N_e = f(1/T_x), \tag{20}$$

при заданных дискретных значениях температуры.

Описанное техническое решение магнитополевого измерителя имеет широкие функциональные возможности по определению температурных характеристик удельной электропроводности исследуемого материала волновода и по прогнозированию содержания в нём донорных или рецепторных примесей. Точность результатов измерений зависит от погрешностей используемых приборов и преобразователей: КИП1, КИП2, амперметра А, вольтметра В, ПТК, ЦИТ, а также от погрешности аналого-цифрового преобразователя, встроенного в МК.

Вариант 2

На рис. 2 приведена комбинированная схема цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 2), где одноименные функциональные блоки обозначены также, как и на рис. 1, а новые блоки обозначены следующим образом: *С*З — развязывающий конденсатор; АП1 и АП2 — первый и второй автоматические переключатели. Последние включены, как показано на рис. 2. Второй вариант магнитополевого измерителя удельной электропроводности отличается от предыдущего двухтактным режимом работы: при исходном и пространственно инвертированном положениях волновода.

Такой режим обеспечивается путем введения в схему автоматических переключателей АП1 и АП2, подключенных определенным образом к другим элементам схемы (рис. 2). При этом электрический нагрев материала волновода не предусматривается, поскольку в некоторых случаях необходимы значительные затраты электрической мощности для нагрева волновода. При необходимости исследования температурных характеристик удельной электропроводности материалов, нагрев волновода может осуществляться неэлектрическим способом с последующим естественном или искусственном охлаждении априори нагретого волновода. Контроль температуры волновода также осуществляется с помощью ЦИТ.

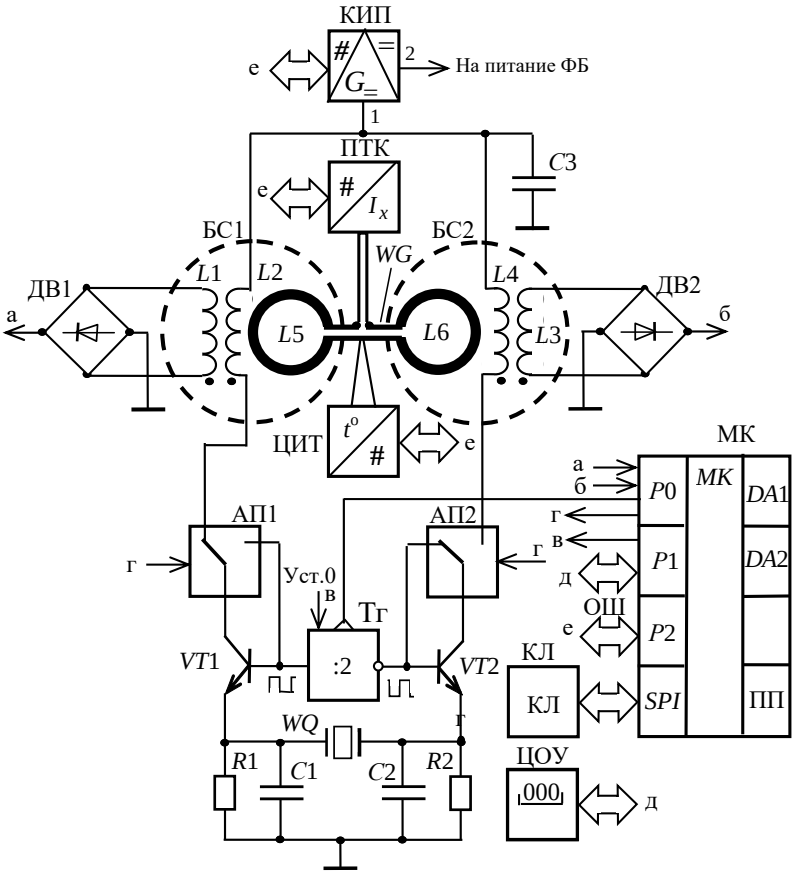


Рис. 2. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 2)

При измерениях удельной электропроводности, например, собственных полупроводников, в память микроконвертора МК вводятся значения следующих величин: U_{og}, $\overline{l_{eg}}$, ΔS_o, T_0, Δh_g, S_g и V_g.

Двухтактная работа измерителя связана с поочередным действием (в нечетные и четные полупериоды сигнла низкой частоты коммутации) соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты: то на электроны контура *L5* волновода *WG* — через катушку индуктивности *L2*, то на электроны контура *L6* волновода *WG* — через катушку индуктивности *L4*. Процесс измерения в первом и во втором тактах (при движении электронов по часовой стрелке) проводится при исходном положении волновода *WG*. После пространственного инвертирования волновода проводятся еще два такта измерений — уже при движении электронов против часовой стрелки.

Полученные результаты измерений записываются в оперативную память микроконвертора МК, где обрабатываются по соответствующим уравнениям величин:

в первые два такта (при движении электронов по часовой стрелке) — по уравнениям величин

$$\sigma^{+}_{xg1} = \frac{I^{+}_{xg1}}{U^{+}_{xg1}} \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}}} \text{ См/м}, \tag{21}$$

$$\sigma^{+}_{xg2} = \frac{I^{+}_{xg2}}{U^{+}_{xg2}} \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}}} \text{ См/м}, \tag{22}$$

во вторые два такта (при движении электронов против часовой стрелке) — по уравнениям величин

$$\sigma^{-}_{xg1} = \frac{I^{-}_{xg1}}{U^{-}_{xg1}} \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}}} \text{ См/м}, \tag{23}$$

$$\sigma^{-}_{xg2} = \frac{I^{-}_{xg2}}{U^{-}_{xg2}} \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}}} \text{ См/м}. \tag{24}$$

При этом определяется наиболее точный результат, — согласно уравнениям величин

$$\sigma^{+}_{xg\Sigma} = (\sigma^{+}_{xg1} + \sigma^{+}_{xg2}) / k_2 = \left[\frac{I^{+}_{xg1}}{U^{+}_{xg1}} + \frac{I^{+}_{xg2}}{U^{+}_{xg2}} \right] \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}} k_2} \text{ См/м} \tag{25}$$

и

$$\sigma^{-}_{xg\Sigma} = (\sigma^{-}_{xg1} + \sigma^{-}_{xg2}) / k_2 = \left[\frac{I^{-}_{xg1}}{U^{-}_{xg1}} + \frac{I^{-}_{xg2}}{U^{-}_{xg2}} \right] \cdot \frac{1}{\overline{l_{eg}} k_2} \text{ См/м}, \tag{26}$$

где $k_2 = 2$.

Дополнительно вычисляется плотность тока в первые два такта (при движении электронов по часовой стрелке), — согласно уравнению величин

$$J^{+}_{x1,2} = \frac{I^{+}_{x1,2}}{\Delta S_o} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right], \tag{27}$$

где $I^{+}_{x1,2} = I^{+}_{x1} = I^{-}_{x2}$,

и во вторые два такта (при движении электронов против часовой стрелке), — согласно уравнению величин

$$J^{-}_{x1,2} = \frac{I^{-}_{x1,2}}{\Delta S_o} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right], \tag{28}$$

где $I^{-}_{x1,2} = I^{-}_{x1} = I^{-}_{x2}$.

Затем определяется разность сумм (слагаемых) (25) и (26) полученных значений удельной электропроводности материала, которая сравнивается с нулём. Прогнозируется, что при

$$\left[\{\sigma^{+}_{xg1}\} + \{\sigma^{+}_{xg2}\} \right] - \left[\{\sigma^{-}_{xg1}\} + \{\sigma^{-}_{xg2}\} \right] > 0 \tag{29}$$

материал волновода содержит донорную добавку, а при

$$\left[\{\sigma^{+}_{xg1}\} + \{\sigma^{+}_{xg2}\} \right] - \left[\{\sigma^{-}_{xg1}\} + \{\sigma^{-}_{xg2}\} \right] < 0 \tag{30}$$

— рецепторную.

По сравнению с первым, второй вариант магнитополевого измерителя обеспечивает повышение точности измерений удельной электропроводности исследуемого материала волновода за счет двухтактной

работы измерителя и использования уравнений величин (25) и (26). Согласно уравнений величин (29) и (30), описанное техническое решение также дает возможность прогнозирования содержания в материале волновода донорных или рецепторных примесей.

Вариант 3

На рис. 3 приведена комбинированная схема третьего варианта цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов, где, по сравнению с предыдущими схемами, новые функциональные блоки обозначены как: *VD*1 и *VD*2 — первый и второй диоды; МГ1 и МГ2 — первая и вторая микрометрические головки; ПР1 и ПР2 — первый и второй подстроечные резисторы; *L*7 и *L*8 — седьмая и восьмая катушки индуктивности. Последние расположены, соответственно, на третьем и четвертом цилиндрических каркасах (на рис. 3 не показано).

Недостатком первого и второго вариантов описанных технических решений магнитополевых измерителей является наличие дополнительных затрат времени на осуществление пространственного инвертирования волновода с целью изменения направления движения электронов на противоположное. Эту задачу можно решить иначе, — путем дополнительного введения в измеритель и размещения нескольких катушек индуктивности, формирующих соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты и реагирующих на его действие.

Отличительной особенностью работы предложенного МПИ УЭП является следующее. В нечетные полупериоды сигнала низкой частоты коммутации (автоматические переключатели АП1 и АП2 находятся в положении, показанном на рис. 3) ток высокой частоты течет через транзистор *VT*1 и катушку индуктивности *L*2.

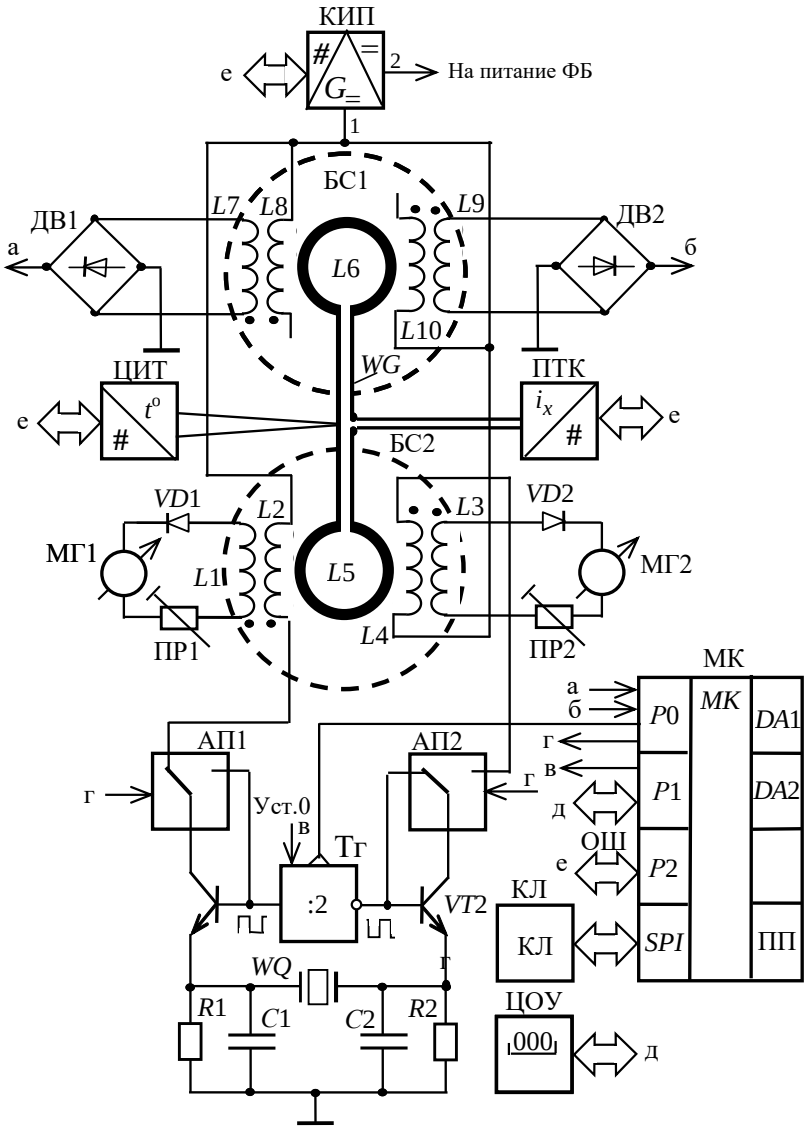


Рис. 3. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 3)

В четные полупериоды сигнала низкой частоты коммутации ток высокой частот течет через транзистор *VT*2 и катушку индуктивности *L*4, поскольку автоматические переключатели АП1 и АП2 находятся в положениях, противоположных указанному на рис. 3).

На выходах первого и второго двухполупериодных выпрямителей ДВ1 и ДВ2 появляются напряжения U_{xni}^{+} и U_{xni}^{-}, которые поочередно, по заданной программе поступают, через коммутатор каналов, на встроенный в микроконвертор МК аналого-цифровой преобразователь. Указанные напряжения преобразуются в соответствующие коды чисел и запоминаются в оперативной памяти микроконвертора. Одновременно измеряются и запоминаются значение тока в замкнутом контуре волновода *WG* и значение температуры. Обработка полученных данных осуществляется по программе, записанной в память микроконвертора МК.

Особенностью конструкции измерителя является то, что катушки индуктивности *L*2 и *L*4, *L*1 и *L*3 располагаются соосно с осью контура *L*5 волновода *WG*, но по разные (диаметрально противоположные) стороны. Так же расположены и катушки индуктивности *L*8 и *L*10, *L*7 и *L*9, — соосно со вторым контуром *L*6 волновода *WG*.

Второй особенностью является введение отрицательной обратной связи (см. последовательно соединенные элементы *L*1, *VD*1, МГ1, ПР1 и элементы *L*3, *VD*2, МГ2, ПР2) по магнитным потокам с целью стабилизации индукции магнитного поля. Введение отрицательной обратной связи направлено на повышение точности измерений.

Третьей особенностью технического решения третьего варианта измерителя является однотактный режим работы, при котором обеспечивается принудительное движение электронов в замкнутом контуре волновода *WG* сначала по часовой стрелке (индекс «+»), а затем — против часовой стрелки (индекс «–»). Процесс измерения в каждом из этих случаев включает по 10-50 тактов частоты коммутации. Это дает возможность дополнительно провести усреднение *N* результатов измерений, с целью повышения точности полученных результатов. В этом случае средние значения напряжений ДВ1 и ДВ2 определяются по уравнениям величин (при использовании в качестве материала волновода, например, полупроводника *n*-типа)

$$\overline{U_{xn}^{+}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_{xni}^{+} \text{ В} \tag{31}$$

и

$$\overline{U_{xn}^{-}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_{xni}^{-} \text{ В}, \tag{32}$$

а средние значения удельной электропроводности определяются согласно уравнениям величин

$$\overline{\sigma_{xn}^{+}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \sigma_{xni}^{+} \text{ См/м}, \tag{33}$$

$$\overline{\sigma_{xn}^{-}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \sigma_{xni}^{-} \text{ См/м}, \tag{34}$$

После этого определяется разность значений удельной электропроводности материала, полученные согласно (33) и (34), которая сравнивается с нулем. При

$$\left\{\overline{\sigma_{xn}^{+}}\right\} - \left\{\overline{\sigma_{xn}^{-}}\right\} > 0 \tag{35}$$

полагают, что материал волновода содержат донорную примесь, а при

$$\left\{\overline{\sigma_{xn}^{+}}\right\} - \left\{\overline{\sigma_{xn}^{-}}\right\} < 0 \tag{36}$$

— рецепторную.

Средние значения плотности тока определяются согласно уравнениям величин

$$\overline{J_{xn}^{+}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} J_{xni}^{+} = \frac{1}{\Delta S_{\text{о}} N}\sum_{i=1}^{N} I_{xni}^{+} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right] \tag{37}$$

и

$$\overline{J_{xn}^{-}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} J_{xni}^{-} = \frac{1}{\Delta S_{\text{о}} N}\sum_{i=1}^{N} I_{xni}^{-} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right]. \tag{38}$$

Следует отметить, что данный вариант технического решения магнитополевого измерителя обеспечивает измерение удельной электропроводности любого материала (не только полупроводникового). Главное, чтобы из этого материала можно было изготовить плоский двухконтурный волновод.

Как и в предыдущих вариантах, в третьем варианте измерителя предусмотрен контроль рабочей температуры нагрева волновода.

Техническое решение третьего варианта магнитополевого измерителя обеспечивает: измерение удельной электропроводности собственных полупроводников, полупроводников *n*-типа и *p*-типа, проводящих материалов и диэлектриков; исключение операции пространственного инвертирование волновода; стабилизацию вектора индукции импульсного магнитного поля; высокую точность и чувствительность измерений, которая обеспечивается путем проведения 10-50 измерений и усреднения полученных результатов, а также получение сведений о наличии примесей в материале волновода, о плотности тока в контуре волновода и т.п.

Предложенные технические решения магнитополевых измерителей удельной электропроводности отличаются от известных широкими функциональными возможностями, — измерением удельной электропроводности как собственных полупроводников, полупроводников *n*-типа и *p*-типа, так и проводников и диэлектриков, обеспечивают определение температуры волновода и температурных характеристик электропроводности материалов, одно- и двухтактные режимы работы, а также функциональную обработку полученных результатов.

Выводы

Описана сущность магнитополевых методов и средств измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов, предполагающие использование операций пространственного инвертирования двухконтурного волновода.

Установлено три разновидности магнитополевых методов измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов: метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия); метод, использующий пространственное инвертирование волновода и организацию движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений); метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В последнем случае используется поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на плоские контура волновода.

Показана необходимость определения и ввода в оперативную память МК значений следующих величин: U_{on}, $\overline{l_{en}}$, ΔS_o, $T_0,...,T_k$ $\Delta T = 5\,^oC$, Δh_n, S_n и V_n.

Установлено, что магнитополевые измерители удельной электропроводности обеспечивают измерения не только удельной электропроводности собственных полупроводников, полупроводников *n*-типа и *p*-типа при разных направлениях движения электронов в замкнутом контуре волновода, но и плотности тока в нем, а также определить количество электронов в $1\,м^3$ исследуемого материала.

Констатируется, что базовым функциональным элементом магнитополевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов является генератор «пачек» импульсов высокой частоты, обеспечивающий получение соленоидального импульсного магнитного поля той же частоты, а также плоского двухконтурного волновода, выполненного из исследуемого материала.

Магнитополевые измерители электропроводности полупроводниковых материалов имеют широкие функциональные возможности, поскольку обеспечивают измерение удельной электропроводности проводящих материалов и диэлектриков.

Каждый вариант схемотехнического решения магнитополевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов отличается от других по точности измерений, по функциональным возможностям и по простоте реализации за счет использования типовых радиоэлементов, средств измерительной и вычислительной техники.

Описанные схемотехнические решения измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов расширяют наши представления и знания о новейшем направлении в метрологии — о магнитополевых методах и средствах измерений.

Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 4. Магнитополевые методы и измерительные преобразователи / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6. – С. 183–197.

2. Патент України на винахід № 119073. Магнітополевий вимірювальний перетворювач / Кондратов В.Т. – Бюл. № 8, 25.04.2019.

References

1. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshestvo. Chast 4. Magnitopolevye metody i izmeritelnye preobrazovateli / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 6. – S. 183–197.

2. Patent Ukrainy na vynakhid № 119073. Mahnitopolevyi vymiriuvalnyi peretvoriuvach / Kondratov V.T. – Biul. № 8, 25.04.2019.

Рецензія/Peer review : 17.11.2019 р. Надрукована/Printed : 15.01.2020
Рецензент: д.т.н., проф. Себко В.

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-222-226
УДК 663.479.1

А.С. ЗЕНКІН, С.В. САЛАТА
Київський національний університет технологій та дизайну

ОЦІНКА ЯКОСТІ І БЕЗПЕЧНОСТІ СЛАБОАЛКОГОЛЬНИХ И БЕЗАЛКОГОЛЬНИХ НАПОЇВ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА

Мета статті – аналіз оцінки якості і безпечності слабоалкогольних і безалкогольних напоїв вітчизняного виробництва. Ринок напоїв з кожним роком поповнюється все більшою кількістю нових продуктів, але нерідко виробники вводять споживачів в оману, використовуючи хімічні добавки без вказівки цього на упаковці. Ці речовини можуть бути не тільки небезпечні, але і нести серйозну загрозу для життя і здоров'я людини. Асортимент продукції як на світовому ринку, так і в Україні розширюється, в основному, за рахунок використання нових, нетрадиційних видів сировини, а також різних харчових добавок, які покращують їх органолептичні і фізико-хімічні показники, але не завжди асоційовані з користю для здоров'я споживачів. Результати: проведено аналіз напоїв та обґрунтовано методи і вимоги до контролю якості, які забезпечують високу якість.

Ключові слова: безалкогольні напої,слабоалкогольні напої, пиво, квас, якість безалкогольної продукції, кваліметрична модель, ризики підприємств.

A.S. ZENKIN, S.V. SALATA
Kyiv National University of Technology and Design

QUALITY ASSURANCE AND SAFETY ASSESSMENT OF DOMESTIC PRODUCTION

The article examines the industry of low-alcoholic and non-alcoholic beverages of Ukraine and analyses the main methods and requirements for assessing the quality and safety of kvass and beer in domestic production. The purpose of the article is to analyse the quality and safety assessment of low alcohol and non-alcoholic beverages of domestic production. The beverage market is growing more and more with each passing year, but often manufacturers are misleading consumers by using chemical additives without specifying it on the packaging. These substances can not only be dangerous but also pose a serious threat to human life and health. The range of products in the world market and in Ukraine is expanding, mainly due to the use of new, unconventional types of raw materials, as well as various nutritional supplements that improve their organoleptic and physic-chemical characteristics, but not always associated with the benefits of health consumers. Results: The analysis of beverages was performed and the methods and requirements for quality control ensuring high quality were substantiated.

Keywords: soft drinks, low alcohol drinks, beer, kvass, quality of non-alcoholic products, qualimetric model, enterprise risks.

Вступ. В ході порівняння різних груп безалкогольних напоїв з точки зору лікувально-профілактичного та загальнооздоровчого впливу на організм людини найбільш перспективними виявлено ферментовані напої. Їх активна оздоровча дія обумовлена не тільки використанням виключно натуральної рослинної сировини, а й застосуванням в технологічному процесі культур корисних людині мікроорганізмів. Типовим представником ферментованих напоїв є традиційний для слов'янських народів хлібний квас.

Квас – це стародавній слов'янський напій. Квасом (рос. квасить, польськ. kwas – кислота) традиційно називають напій, який отримують бродінням. Він здавна вважався одним з найкращих освіжаючих напоїв. Квас чудово втамовує спрагу, бадьорить та освіжає. Цілющі властивості квас набуває саме в процесі бродіння. Квас має приємний смак, покращує обмін речовин, корисний для травлення, позитивно впливає на діяльність серцево-судинної системи. Різноманіття мікроорганізмів, що містяться в напої, позитивно впливають на мікрофлору шлунка. Він містить вітаміни групи В, кальцій, магній, фосфор, молочну кислоту, амінокислоти. Завдяки його властивостям попит споживачів на цій напій поступово збільшується.

Пиво — слабоалкогольний, висококалорійний, ігристий напій з характерним хмелевим ароматом і приємним гіркуватим смаком. У пиві міститься вода, етиловий спирт, двооксид вуглецю, білки, вуглеводи, мікроелементи, вітаміни: A, D, E, B1, B2, B6 і H (біотин), які зміцнюють нервову систему. Один літр пива покриває 35 % денної потреби у вітаміні B6, 20 % – у вітаміні B2 і 65% – ніацині, який необхідний для розщеплення цукрів і жирних кислот. У цілому в 1 л пива міститься 210 мг вітамінів.

Завдяки вмісту вуглекислого газу пиво добре вгамовує спрагу. Завдяки гірким речовинам хміль викликає апетит і діє заспокійливо. Будучи гарним емульгатором їжі, пиво сприяє більше правильному обміну речовин і підвищенню засвоюваності їжі. Наявність білків, вуглеводів, вітамінів і органічних кислот обумовлює поживну цінність цього напою. В безлічі країн світу і користується популярністю завдяки своїм смаковим якостям і аромату.

Зростаюча вимогливість споживачів до якості напоїв передбачає постійний пошук у напрямку вдосконалення технологій та покращання якості готової продукції. Тому важливим є питання прогнозування розвитку попиту споживачів, проектування і розробки нових рецептур напоїв бродіння як масового, так і функціонального призначення. Проведення аналізу розвитку виробництва напоїв за останні роки виявило очевидну тенденцію до їх "натуралізації". Таким чином стратегічним напрямком розвитку галузі є використання натуральних та безпечних інгредієнтів.

Основна частина. Українські пивовари минулого року поставили до країн Європейського союзу 11 млн літрів пива, що склало 3 % від усього обсягу ввезеного в Європу продукту. Таким чином, Україна стала шостою країною з експорту пива для європейського ринку. Зазначається, що за даними аналітичної компанії, у 2017 році експорт українського пива збільшився на 50% порівняно з 2016 роком. Головним його імпортером в ЄС була Литва – 8,2% від усіх поставок.

При цьому до 2014 року головним споживачем українського пива була Росія – 50%. Потім йшли Білорусь і Молдова (по 20%). У 2017 році пиво в РФ практично не експортувалося, а поставки в Білорусь і Молдову знизилися сумарно на 8 млн літрів.

Водночас, згідно з даними головними постачальниками пива в ЄС у 2017 році були Мексика (211 млн л – 52% від усього імпорту), Сербія (48 млн л – 12%), США (39 млн л – 10%), Білорусь (23 млн л – 6%), Китай (16 млн л – 4%) і Україна (11 млн л – 3%).

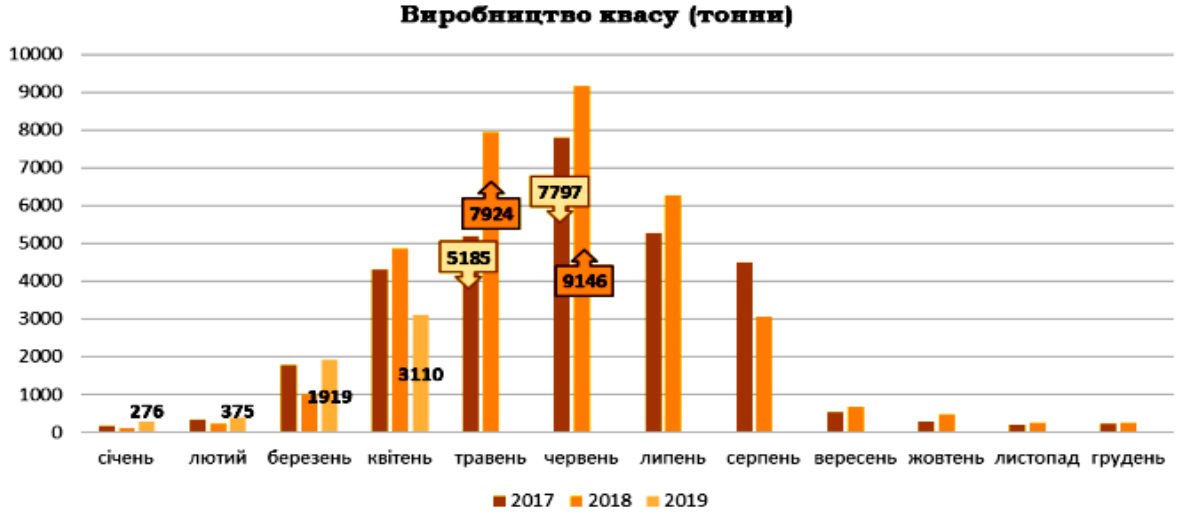
Україна має також великий потенціал для розвитку експорту безалкогольних напоїв та являється досить значним постачальником продукції за кордон. Квас є одним з найвідоміших безалкогольних напоїв, внутрішнє виробництво якого за останні два маркетингових роки демонструвало зростання. Згідно з даними Державної служби статистики, загальний обсяг виробництва даного напою у 2018 році склав 34,2 тис. т, що на 10,7% перевищує показник 2017 року (30,5 тис. т).

Розглядаючи ситуацію поточного року, а саме періоду січень-квітень, варто відзначити зниження показника виробництва у порівнянні з аналогічним періодом 2017-2018 рр. на 13,8% та на 8,3% відповідно. Загалом вітчизняний обсяг склав 5,8 тис. т. Однозначно говорити про зниження рано, так як пік виробництва та торгівлі (внутрішньої та експортної) припадає на теплий період. Основними країнами-покупцями у поточному році були Білорусь (59% всього експорту), Німеччина (21,5%) та Молдова (8,8%).

Лідерами на українському ринку квасу є ТМ «Квас Тарас» (Carlsberg Group), ТМ «Ярило» («Квас Бевериджиз»), ТМ «Львівський квас» («Перша приватна броварня»), ТМ «Древлянський» («Рідна Марка») та ТМ «Арсеніївський квас» («Укрпродукт Груп»).

Таблиця 1

Сумарний обсяг експорту з України



Оцінку якості напоїв на підприємствах здійснюють експерти у випробувальних лабораторіях. Одним із методів контролю якості є оцінка якості приладів (обладнання), які виготовляють напої (від постачання сировини до отримання кінцевої продукції). Випробувальна лабораторія повинна мати необхідне обладнання та засоби для вимірювання всіх параметрів продукції. Приміщення повинно відповідати вимогам методик випробувань, а також санітарним нормам і правилам, вимогам безпеки праці та охорони навколишнього середовища. Обладнання, що застосовується у випробувальних лабораторіях, обов'язково мають бути атестовані та повірені.

Також на підприємствах здійснюється оцінка якості професійно-кваліфікаційного рівня працівників, тобто проводять атестацію працівників на здобуті професійні навички та знання.

Слід зазначити, що існує також кваліметрична оцінка якості та безпечності безалкогольних напоїв. Під час кваліметричної оцінки якості формують модель прогнозування якості і безпечності продукції. Модель прогнозування складається з певних етапів кваліметричного прогнозування, які включають ідентифікацію показників якості та безпеки; розробку документації для оцінки якості продукції споживачами; вивчення кореляційної залежності. Дані етапи дозволили науково обґрунтувати комплексні показники якості і запропонувати методичні вказівки для практичної реалізації нових видів. На рис. 1 представлений алгоритм кваліметричної моделі прогнозування якості і безпечності напоїв.

Квас одержують на основі житнього і ячмінного солоду, житнього і ячмінного борошна, квасних хлібців або концентрату квасного сусла.

При купажуванні квасу використовують цукровий сироп. Для деяких сортів квасу 59 застосовують концентрати яблучного й виноградного соку, ряд смакових й ароматичних добавок. Концентрат квасного сусла (ККС) являє собою грузлу густу рідину темно-коричневого кольору, кисло-солодкого смаку з ароматом житнього хліба. ККС містить близько 70,0 мас % сухих речовин з кислотністю в межах 16–40 мл на 1 н NaOH на 100 г концентрату.

Рис. 1. Алгоритм для формування кваліметричної моделі прогнозування якості і безпечності слабоалкогольних і безалкогольних напоїв

Теплота, що виділяється в ході бродіння, видаляється із апарата через теплообмінники. Бродіння йде при 30 °С. Під час приготування хлібного квасу дозволяється заміняти до 50 % ККС неохмеленим пивним суслом із розрахунку 64,8 дм^3 зі вмістом сухих речовин 15% на 100 дал квасу. Зброджування цукру у квасному суслі в кількості 0,6-0,8 % не може забезпечити інтенсивного бродіння, тому перед бродінням у сусло вводять 25 % цукру від загальної маси, що витрачається для готування квасу. Шляхом купажування забродженого квасного сусла із цукровим одержують хлібний квас бродіння. Купажування квасу й перемішування середовища триває 1,5–6,5 год, а зброджування сусла – 10–18 год. Строк зберігання квасу бродіння – 2 доби. За цей час вміст спирту у квасі зростає до 1-1,2 мас. %, а вміст сухих речовин знижується до 4,2-4,6 г/100 г квасу.

Основними складовими у процесі виробництва пінного напою є хміль і солод. Класична технологія виробництва пива містить наступні основні етапи: отримання солоду з ячменю, приготування сусла, зброджування сусла, витримка пива, оброблення і розливання пива. Це складний процес, який триває 60–100 днів і багато в чому залежить від кваліфікації пивовара. Незважаючи на те, що вихідною сировиною є одні й ті ж компоненти, якість пива, що виробляється різними підприємствами, відрізняється одна від одної.

Солод є основним матеріалом для виробництва пива Такі характеристики солоду, як смак, колір і запах часто відіграють вирішальну роль у визначенні типу пива, що одержується з нього, а його якість впливає на якість пива. Тому отриманню солоду приділяється особлива увага. Він має свої характерні властивості саме у процесі вирощування, а так само залежить від якості зерна, що використовується для нього.

Для приготування солоду застосовується, як правило, ячмінь. Це пояснюється легкістю його оброблення, гарною схожістю і невибагливістю до ґрунтово-кліматичних умов і найбільш придатними

смаковими якостями. Ячмінний солод дозволяє отримувати пиво з найкращими показниками.

Незважаючи на відмінність технологічних процесів виготовлення слабоалкогольних та безалкогольних напоїв їх поєднує один із процесів, а саме приймання сировини для виробництва пива та квасу (рис. 2). Адже сировина суттєво впливає на якість виготовлення продукції.

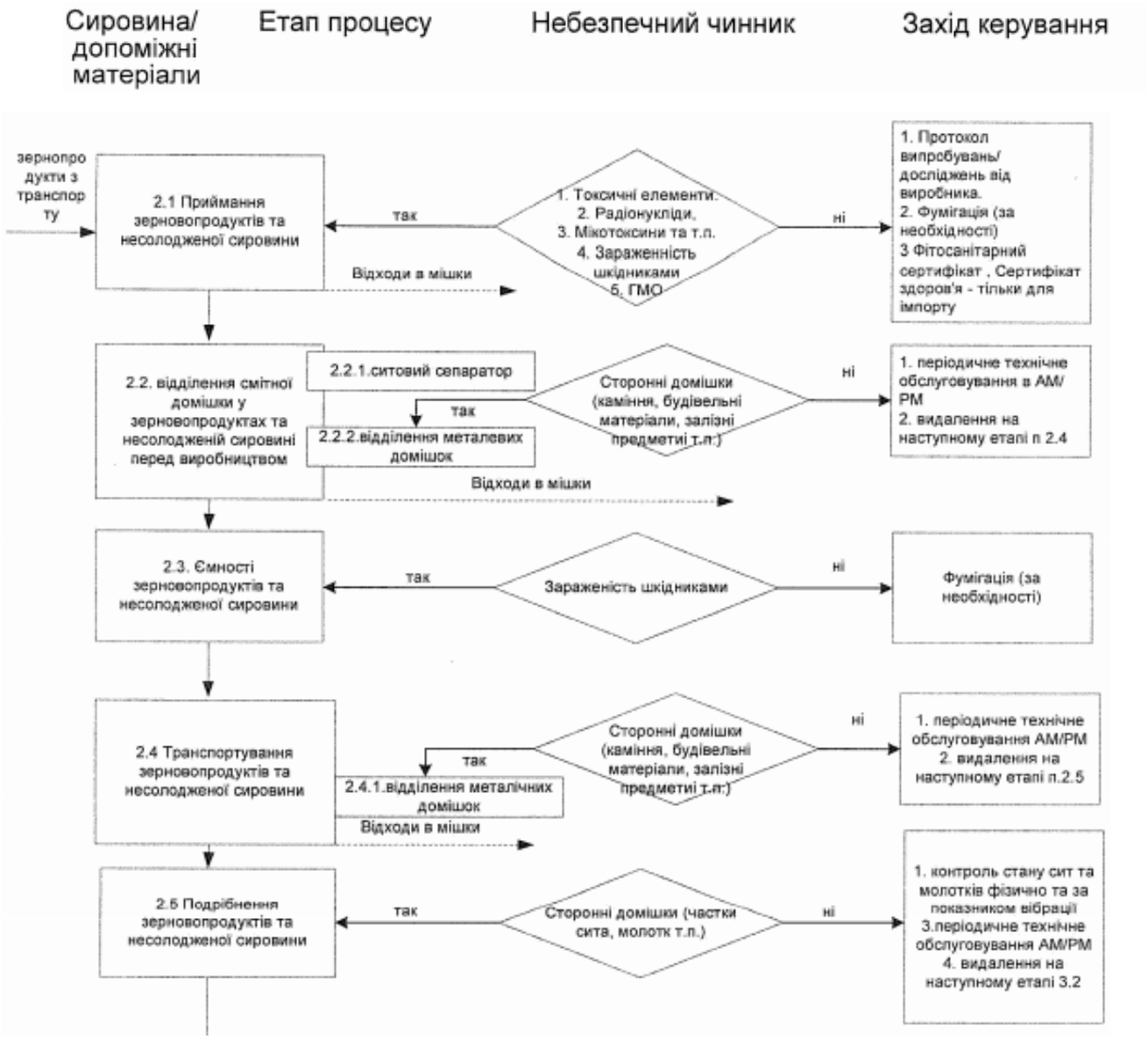


Рис. 2. Контроль якості процесу приймання сировини для виробництва квасу та пива

В разі отримання незадовільних результатів аналізів хоча б по одному з органолептичних та фізико-хімічних показників по ньому проводять повторний аналіз подвоєного обсягу вибірки з тієї ж партії продукції. Результати повторних аналізів поширюються на всю партію.

В процесі досліджень якості та безпечності на діючому підприємстві запропонований алгоритм виявлення та усунення ризиків конкурентоспроможності підприємств (рис. 3).

Таким чином проведені дослідження дозволяють стверджувати, що невід'ємним атрибутом підприємств виробництва напоїв є зовнішні та внутрішні ризики, що виникають в умовах невизначеності. Невизначеність ризику проявляється у відсутності повної і точної інформації про продукт, неможливості точної оцінки всіх параметрів продукту; присутності елементу випадковості, тобто неможливість спрогнозувати чи передбачити всі чинники, які можуть впливати на продукт тощо.

Висновки. Результати дослідження дають можливість дійти висновку, що напої становлять певну складову раціону харчування кожної людини. Тому основну роль відіграє якість та безпечність напою, яка, в першу чергу, залежить від стану сировини, виробничого обладнання, наявності технологій і кваліфікації персоналу. Сировина квасу залежить від певних показників, які обов'язково мають відповідати встановленим вимогам та нормам. Як відомо, на кожному підприємстві існують зовнішні та внутрішні ризики, які також необхідно усувати для забезпечення якості та безпечності безалкогольних та слабоалкогольних напоїв.

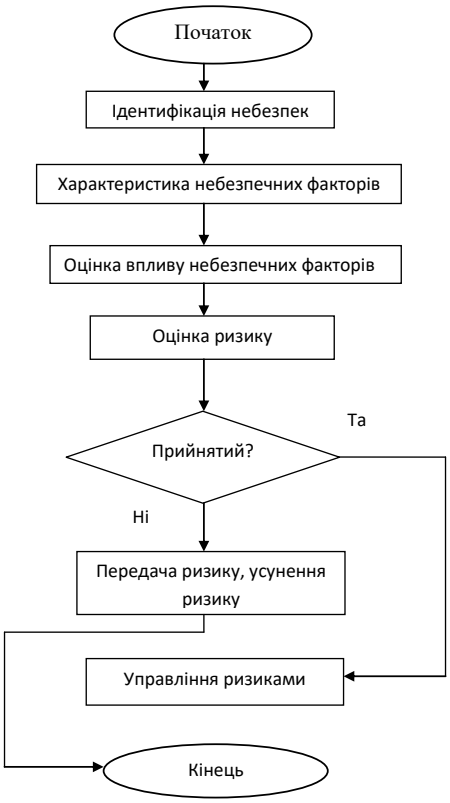


Рис. 3. Алгоритм виявлення та усунення ризиків на підприємстві

Література

1. Климов Р. В. Аспекты разработки технологии и рецептур напитков брожения как функциональных продуктов / Р. В. Климов // Техн. и товаровед. инновац. пищ. прод. – 2010. – № 3. – С. 44–47.

2. Дубліна А.А. Методи визначення фальсифікації товарів / Дубліна А.А. – 2010. – С. 74–89.

3. Ковальчук В. М. Квас и напитки из хлебного сырья / В. М. Ковальчук // Пищевая промышленность. – 2008. – № 3. – С. 8-9.

4. Зенкин А.С. Разработка квалиметрической модели прогнозирования показателей качества и безопасности молочних продуктов / А.С. Зенкин, І.В. Назаренко, А.А. Кудрявцева // Вісник Інженерної академії України : теорет. і наук.-практ. часопис / Інж. акад. України. – Київ : НАУ, 2016. – № 2. – С. 120–127.

5. ДСТУ 2368:2004. Напої безалкогольні. Виробництво. Терміни та визначення. Національний стандарт України.

6. Чепурний І.П. Слабоалкогольні напої: пиво / І.П. Чепурний // Маркетинг. – 2002. – 229 с.

7. Яровенко В.Л. Технология солода, пива и слабоалкогольных напитков / В.Л. Яровенко, В.А. Домарецкий, Р.А. Колчева. – М., 1992. – 450 с.

8. Экспертиза напитков / В.М. Позняковский [и др.]. – 5-е изд., испр. и доп. – Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2002. – 384 с.

9. Корн А. Ситуация на украинском рынке кваса / А. Корн // Food & Drinks. Продукты и напитки. – 2008. – № 6. – С. 60–68.

10. Чепурний І.П. Слабоалкогольні напої: пиво / І.П. Чепурний // Маркетинг. – 2002. – 229 с.

11. Яровенко В.Л. Технология солода, пива и слабоалкогольных напитков / В.Л. Яровенко, В.А. Домарецкий, Р.А. Колчева. – М., 1992. – 450 с.

References

1. Klimov R. V. Aspekty razrabotki tehnologii i receptur napitkov brozheniya kak funkcionalnyh produktov / R. V. Klimov // Tehn. i tovaroved. innovac. pish. prod. – 2010. – № 3. – S. 44–47.

2. Dublina A.A. Metody vyznachennia falsyfikatsii tovariv / Dublina A.A. – 2010. – C. 74–89.

3. Kovalchuk V. M. Kvas i napitki iz hlebnogo syrya / V. M. Kovalchuk // Pishevaya promyshlennost. – 2008. – № 3. – S. 8-9.

4. Zenkin A.S. Razrabotka kvalimetricheskoj modeli prognozirovaniya pokazatelej kachestva i bezopasnosti molochnih produktov / A.S. Zenkin, I.V. Nazarenko, A.A. Kudryavceva // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy : teoret. i nauk.-prakt. chasopys / Inzh. akad. Ukrainy. – Kyiv : NAU, 2016. – № 2. – S. 120–127.

5. DSTU 2368:2004. Napoi bezalkoholni. Vyrobnytstvo. Terminy ta vyznachennia. Natsionalnyi standart Ukrainy.

6. Chepurnyi I.P. Slaboalkoholni napoi: pyvo / I.P. Chepurnyi // Marketynh. – 2002. – 229 s.

7. Yarovenko V.L. Tehnologiya soloda, piva i slaboalkogolnyh napitkov / V.L. Yarovenko, V.A. Domareckij, R.A. Kolcheva. – M., 1992. – 450 s.

8. Ekspertiza napitkov / V.M. Poznyakovskij [i dr.]. – 5-e izd., ispr. i dop. – Novosibirsk : Sib. univ. izd-vo, 2002. – 384 s.

9. Korn A. Situaciya na ukrainskom rynke kvasa / A. Korn // Food & Drinks. Produkty i napitki. – 2008. – № 6. – S. 60–68.

10. Chepurnyi I.P. Slaboalkoholni napoi: pyvo / I.P. Chepurnyi // Marketynh. –

11. 2002. – 229 s.

Рецензія/Peer review : 2.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-227-232
УДК 621.357

О.І. СТРЕМЕЦЬКИЙ, А.Я. ГАНЗЮК
Хмельницький національний університет
О.П. ШЕЛЕСТЮК
Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр
А.А. МАЛЬОВАНА
Малиницький навчально-виховний комплекс

ВПЛИВ МЕТАНУ НА ПРОЦЕС АНОДНОГО ТРАВЛЕННЯ АЛЮМІНІЮ

Досліджено вплив метану на кінетику анодного розчинення алюмінію у 0,1 М розчинах хлориду натрію, сульфатної кислоти та калію гідроксиду. Встановлено, що в присутності метану, незалежно від природи електроліту, швидкість анодного розчинення алюмінію суттєво зменшується. Крім того, спостерігається сповільнення катодних процесів. Ефективність впливу адсорбції метану збільшується при попередній активації поверхні алюмінію завдяки катодній поляризації, особливо в розчинах хлориду натрію. Адсорбція метану пояснюється наявністю активної поверхні алюмінію та утворенням кластерів метану в порах за участі гідратованої оксидної плівки.

Ключові слова: алюміній, анод, травлення, метан, кінетика.

O.I. STREMETSKYI, A.Ya. HANZIUK
Khmelnytskyi National University
O.P. SHELESTIUK
Khmelnytskyi Scientific Research Forensic Center
A.A. MALOVANA
Malynytskyi Educational Complex

THE INFLUENCE OF METHANE ON THE PROCESS OF ALUMINIUM ANODIC ETCHING

The aim of the research was to study the effect of methane on the kinetics of anodic etching of aluminium in solutions of sodium chloride, sulphuric acid and potassium hydroxide to determine the nature of this effect and the possibility of its use for practical purposes. It is shown that cathode and anode processes are not accompanied by electrochemical transformations of methane. The influence of methane on the kinetics of anodic dissolution of aluminium in 0.1 M solutions of sodium chloride, sulphuric acid and potassium hydroxide was investigated. It is established that in the presence of methane, regardless of the nature of the electrolyte, the speed of anodic dissolution of aluminium is significantly reduced. In addition, there is a slowdown of the cathode processes. The efficiency of exposure to methane adsorption increases upon pre-activation of the aluminium surface due to cathode polarization, especially in sodium chloride solutions. Methane adsorption is explained by the presence of an active aluminium surface and the formation of methane clusters in the pores with the participation of a hydrated oxide film. The ability of methane to inhibit the cathode and anodic processes on aluminium in various environments may find application in anodizing, corrosion protection, selective anode etching of aluminium to obtain a highly developed surface, or to restore contours of deformed metal sections in forensics.

Key words: aluminium, anode, etching, methane, kinetics.

Вступ

Алюміній та його сплави широко застосовуються в багатьох галузях сучасної промисловості завдяки ряду позитивних якостей: низькій густині, значній міцності по відношенню до одиниці маси, корозійній стійкості та електропровідності [1].

Корозійні властивості алюмінію та його сплавів залежать від стану оксидної плівки на його поверхні. Підвищити їх можна шляхом анодної обробки в електролітах, які не руйнують або незначно руйнують оксидну плівку [2]. Анодна обробка алюмінію та його сплавів застосовується також для травлення поверхні з метою полірування або навпаки створення розвинутої поверхні. Останнє відбувається в електролітах, що містять хлориди у якості іонів депасиваторів [3]. Закономірності травлення, при якому спостерігаються різні швидкості розчинення металу на пасивних та активних ділянках поверхні та вплив на процес різних технологічних факторів, актуальні для створення електродів електролітичних конденсаторів, розробки інгібіторів корозії алюмінію, відновлення контурів деформованих ділянок в криміналістиці тощо. Водночас вплив такого технологічного фактору, як склад газової атмосфери над електролітом, що для активної поверхні алюмінію під час травлення може мати істотне значення, вивчено недостатньо [4].

Метою роботи було вивчення впливу метану на кінетику анодного розчинення алюмінію у розчинах хлориду натрію, сульфатної кислоти та калію гідроксиду для визначення природи цього впливу і можливості його використання у практичних цілях.

Методика експерименту

У дослідженнях в якості робочих електродів використовували платинований платиновий електрод площею 2 см^2, алюмінієві електроди з фольги алюмінію марки А99 товщиною 100 мкм та площею 2 см^2. Перед виготовленням алюмінієвих електродів фольгу піддавали термообробці при температурі 350 °С протягом 2 годин для рекристалізації та переходу в пластичний стан.

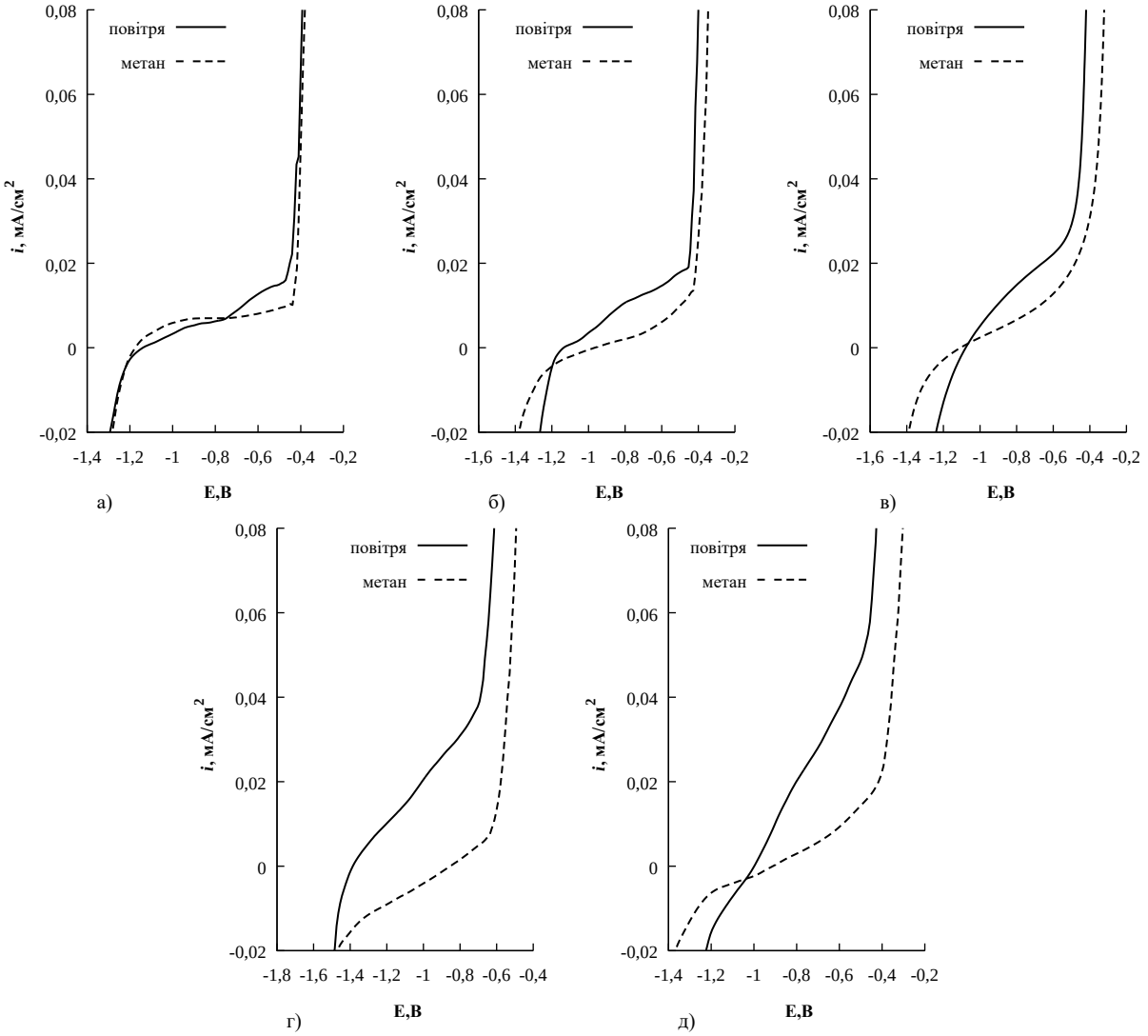
У якості робочих електролітів використовували 0,1 М розчини сульфату натрію, сульфатної кислоти, гідроксиду калію, хлориду натрію. Безпосередньо перед експериментом для попередньої обробки електродів застосовували 10 % розчин сульфатної кислоти для платинового електрода та 10 % розчин гідроксиду натрію для алюмінієвого електрода. Тривалість обробки платинованого платинового електрода складала 10 хвилин при кімнатній температурі, алюмінієвий електрод обробляли при температурі 50 °С до

появи інтенсивного газовиділення. Метан відбирали з газової магістралі й очищали, пропускаючи послідовно через склянки Тищенко, заповнені активованим вугіллям та кислим розчином 0,1 М калію перманганату. Така процедура дозволяє очистити метан від ненасичених вуглеводнів та одорантів.

Дослідження проводились в закритій електрохімічній трьохелектродній комірці, яка мала гідравлічний затвор для газів, допоміжний електрод – платиновий, а електрод порівняння – хлорсрібний. Всі значення потенціалів на графіках представлені відносно стандартного водневого електрода. Для видалення кисню та насичення розчину і поверхні над розчином метаном у комірку подавали очищений метан протягом 30 хвилин, барботуванням його через шар розчину з об'ємною витратою 0,5 л/хв з контролем по ротаметру. Після насичення подачу метану припиняли, а в електроліт занурювали підготовлений електрод, витримували його до початку повільної зміни потенціалу та приступали до отримання поляризаційних кривих.

Експерименти відбувалися при кімнатній температурі, а також при температурах 5, 32, 42, 51, 61 °С, які встановлювали за допомогою термостатування електрохімічної комірки.

Для зняття поляризаційних кривих застосовували потенціостат ПИ 50-1.1 з програматором та двохкоординатним реєстратором, були задіяні різні швидкості розгортки потенціалу, значення яких наведено в підписах до графіків, якщо швидкість не вказана, то вона складала 20 мВ/с. Попередню катодну поляризацію в розчинах хлориду натрію виконували з початкового потенціалу в межах від -0,5 до -0,6 В до кінцевого потенціалу в межах від -1,45 до -1,55 В. У разі катодної поляризації до встановленої величини струму значення кінцевого потенціалу не фіксувалося. В розчинах калію гідроксиду та сульфатної кислоти катодну поляризацію проводили на 0,5-0,6 В від початкового потенціалу. На всіх поляризаційних кривих катодна поляризація показана тільки частково.



а) 5 мВ/с, б) 10 мВ/с, в) 20 мВ/с, г) 50 мВ/с, г) 100 мВ/с

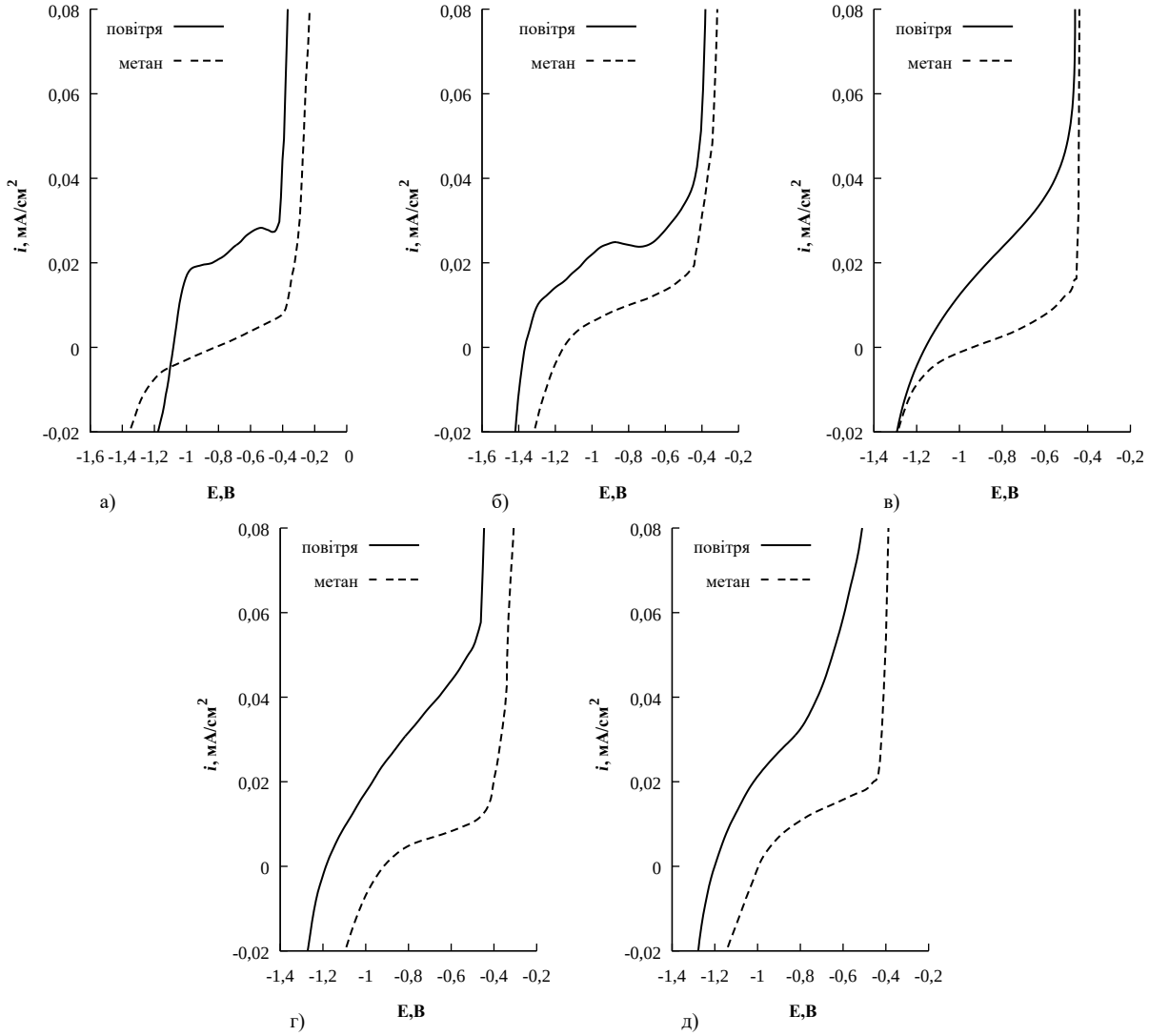
Рис. 1. Потенціодинамічні анодні поляризаційні криві алюмінію після попередньої катодної поляризації у 0,1 М розчині NaCl насиченому метаном та в контакті з повітрям при різних швидкостях зміни потенціалу

Результати експерименту

У раніше виконаних експериментах було встановлено, що насичення електроліту метаном сприяє збільшенню анодної поляризації алюмінієвого електрода та отриманню впорядкованих великих пор на

поверхні металу [4]. На першому етапі експериментів були досліджені катодні и анодні процеси на платинованому платиновому електроді у кислих, нейтральних і лужних середовищах 0,1 М розчинів сульфату натрію, сульфатної кислоти, гідроксиду калію при насичені електролітів метаном, який очищався метаном без очистки. Циклічні потенціодинамічні поляризаційні криві показали, що поведінка платинованого платинового електроду не залежить від складу газової атмосфери. В атмосферних умовах, а також в присутності метану різного ступеню очистки, форми поляризаційних кривих практично не відрізняються. Істотні відмінності спостерігаються тільки у поляризаційних кривих, що були отримані в різних середовищах, що виражається перебігом однотипних процесів у різних областях потенціалів.

Основні процеси на катодній частині поляризаційних кривих полягають у відновлення адсорбованого кисню й кисню, розчиненого в електроліті (для атмосферних умов) та виділення водню. На анодній частині поляризаційної кривої відбувається окиснення водню, що виділився у катодний період, адсорбція кисню на поверхні платини і виділення кисню. Таким чином, можна стверджувати, що як сам метан, так і можливі домішки (меркаптани і ненасичені вуглеводні), які повинні видалятись при очищенні, не приймають участі в електродних реакціях, а можливий вплив метану на анодні процеси на алюмінії буде специфічним і не пов'язаним з його окисненням чи відновленням.



а) 5 °С, б) 32 °С, в) 42 °С, г) 51 °С, г) 61 °С

Рис. 2. Потенціодинамічні анодні поляризаційні криві алюмінію після попередньої катодної поляризації у 0,1 М розчині NaCl насиченому метаном та в контакті з повітрям при різних температурах

Присутність метану збільшує анодну поляризацію алюмінієвого електрода в 0,1 М NaCl, але збільшення поляризації відбувається не завжди, тобто процес погано відтворюється через нестабільний стан гідратованої оксидної плівки, яка утворюється після підготовчого травлення в 10 % розчині гідроксиду натрію. Експериментально було встановлено, що після попередньої катодної поляризації вплив метану стає більш відчутним. Ймовірно, це пов'язано з додатковою активацією поверхні алюмінію за рахунок підлужування приелектродного шару електроліту при виділенні водню з нейтральних середовищ та створення однакових умов в кожному досліді. Тому, в подальшому експерименти проводились з попередньою катодною поляризацією, що водночас дозволило встановити вплив метану на катодний процес.

Як видно з представлених графічних залежностей густини струму від потенціалу при різних швидкостях розгортки потенціалу (рис. 1), на анодних кривих після попередньої катодної поляризації, що були отримані в атмосферних умовах, спостерігаються дві неявно виражених хвилі перед активацією поверхні, яка виражається у різкому збільшенні струму при незмінному потенціалі. При потенціалах першої хвилі під час переходу від катодної до анодної поляризації відбувається утворення гідратованої оксидної плівки, друга хвиля відповідає початку розчинення алюмінію через нещільну анодну плівку через наявність в розчині активуючих поверхню іонів хлору.

Досягнення потенціалу активації поверхні і активного розчинення алюмінію свідчить про істотне збільшення концентрації хлорид-іонів в структурі анодної плівки. В присутності метану відбувається пригнічення першої хвилі та незначне зниження другої, відмічається збільшення поляризації як анодного, так и катодного процесу. Збільшення швидкості поляризації супроводжується вирівнюванням хвиль для атмосферних умов, а також зменшенням поляризації для усіх умов експерименту, але поляризація для атмосферних умов зменшується більш суттєво.

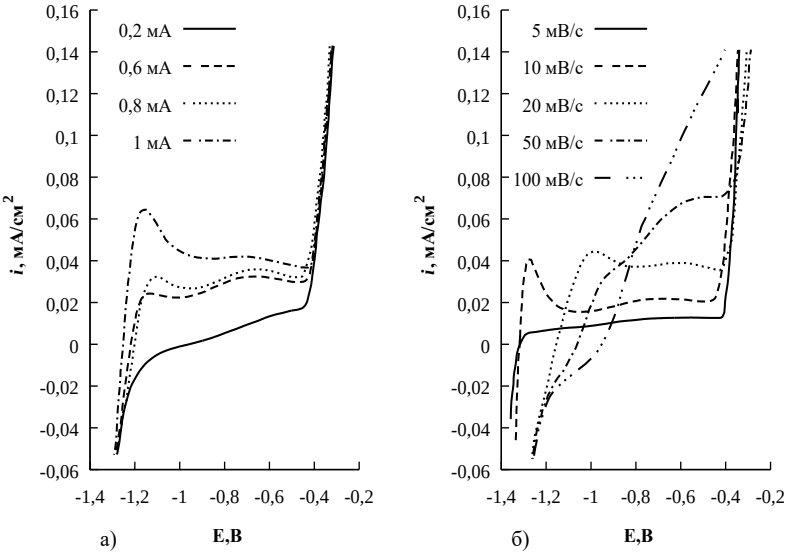


Рис. 3. Потенціодинамічні анодні поляризаційні криві алюмінію у 0,1 М розчині NaCl в контакті з повітрям після попередньої катодної поляризації а) до фіксованого значення струму, б) при різних швидкостях зміни потенціалу від фіксованого значення катодного струму 0,8 мА

Для визначення природи взаємодії метану з алюмінієм були одержані анодні поляризаційні криві з попередньою катодною поляризацією при різних температурах (рис. 2). Результати цих досліджень дозволяють зробити припущення, що вплив метану обумовлений фізичною адсорбцією, оскільки зі збільшенням температури зменшується поляризація анодних процесів, а поляризація катодних стає вищою для атмосферних умов. Зменшення впливу адсорбованого метану проходить з двох причин. З одного боку, зменшується сила взаємодії метану з активною поверхнею алюмінію та гідратованою оксидною плівкою, з іншого – зменшується його розчинність в електроліті зі збільшенням температури. При низьких температурах більш чітко проявляються дві хвилі перед активацією поверхні алюмінію, при високих температурах зменшується струм в області потенціалів першої хвилі і збільшується струм в області потенціалів другої хвилі. Зменшення струму при потенціалах першої хвилі пов'язано з більшою ефективністю утворення оксидної плівки на поверхні алюмінію при збільшенні температури за рахунок хімічної взаємодії активної поверхні з водою. В цьому ж полягає причина збільшення струму при потенціалах другої хвилі внаслідок збільшення швидкості розчинення алюмінію. Отже, стан поверхні перед переходом від катодної до анодної поляризації визначає величину струму в області першої хвилі.

Перевірити це припущення дозволили експерименти з попередньою катодною поляризацією, що виконана для різних значень катодних струмів (рис. 3а) і з різною швидкістю розгортки потенціалу від одного катодного струму (рис. 3а). В результаті було вияснено, що збільшення величини катодного струму призводить до пропорційного збільшення величини анодного струму першої хвилі, величина струму другої хвилі практично не змінюється (рис. 3а). Це може свідчити про вплив попередньої катодної поляризації на активацію поверхні, обумовлену підлужненням приелектродного шару та розчиненням захисної гідратованої оксидної плівки. Відсутність такої хвилі в атмосфері метану пояснюється його адсорбцією на активній поверхні металу та її помітною пасивацією.

Незалежність величини струму другої хвилі від кількості електрики, що витрачається у катодний період дозволяє зробити висновок про однакову швидкість утворення оксидної плівки на алюмінії після процесів деактивації при потенціалах першої хвилі. Наступна активація поверхні алюмінію стає можливою, коли кисневмісні групи на поверхні алюмінію замінюються іонами хлору, що призводить до розчинення алюмінію та швидкого зростання струму [5].

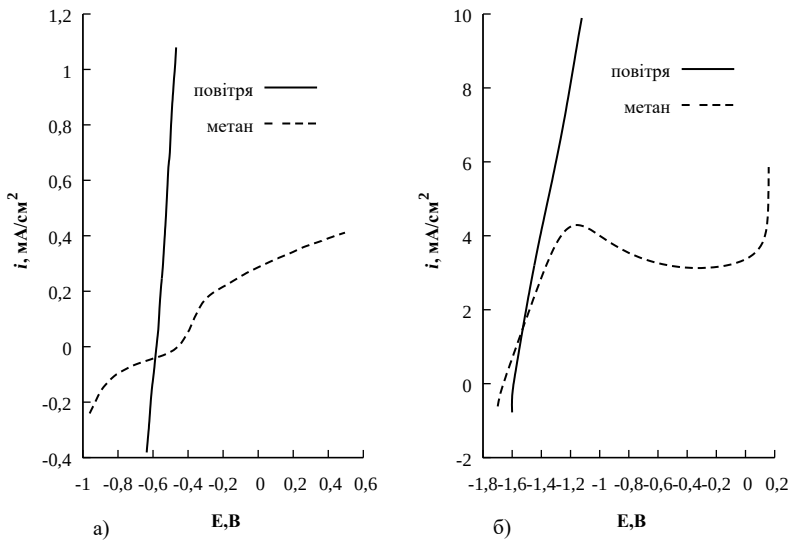


Рис. 4. Потенціодинамічні анодні поляризаційні криві алюмінію після попередньої катодної поляризації а) у 0,1 М розчині H_2SO_4 насиченому метаном та в контакті з повітрям, б) у 0,1 М розчині КОН насиченому метаном та в контакті з повітрям

Доповнити наведені вище узагальнення можна розглянувши поляризаційні криві з попередньою катодною поляризацією, що виконана з різною швидкістю розгортки потенціалу від одного катодного струму (рис. 3б). При високих швидкостях розгортки алюміній може переходити до стану активного розчинення практично без ділянки стабільного утворення оксидної плівки через збільшення концентрації хлорид-іонів біля поверхні електрода, що супроводжується зменшенням анодної поляризації. При низьких швидкостях зберігаються умови для пасивації поверхні після катодної поляризації та переходу до стабільного росту оксидної плівки до моменту активації хлорид-іонами.

Для перевірки впливу метану на анодні процеси у кислих і лужних середовищах були одержані анодні поляризаційні криві з попередньою катодною поляризацією в 0,1 М розчинах H_2SO_4 (рис. 4а) та КОН (рис. 4б). Виявилось, що пасивуючий вплив адсорбованого метану проявляється також і в цих середовищах, оскільки знижуються струми анодного розчинення, збільшується катодна і анодна поляризації, що може бути використано для захисту алюмінію від корозії в різних по складу середовищах. Отже, незалежно від механізму анодного розчинення алюмінію та pH середовища вплив метану залишається без змін, що можна пояснити фізичною адсорбцією на активній поверхні металу.

Молекула метану є неполярною. Взаємодія між окремими молекулами та порами в оксидній плівці і металом може відбуватися тільки за рахунок сил Ван дер Ваальса, які є дуже слабкими в порівняння навіть з водневим зв'язком. Кількісно адсорбція може бути збільшена при утворені кластерів метану за участі коадсорбату, у якості якого часто виступають водні структури [6].

Здатність метану утворювати кластери в оточенні водних структур, які утворюють додаткові мікропори в мезопорах доведена методами мас-спектроскопії, ІЧ-спектроскопії та спектроскопії ЯМР. Доведено це і квантово-хімічним моделюванням. Енергія взаємодії в таких кластерах незначна, але дозволяє збільшити адсорбцію при не дуже низьких температурах [6]. Вірогідно адсорбція метану на активованій поверхні алюмінію доповнюється саме утворенням кластерних структур метану за участі гідратованої оксидною плівки, яка утворюється у водних середовищах. Можливо поверхня алюмінію підсилює таку взаємодію, оскільки вона зберігається за відносно високих температур.

Висновки

В результаті проведеної експериментальної роботи з вивчення впливу метану, розчиненого у електроліті, на анодні процеси розчинення алюмінію можна стверджувати, що в присутності метану, незалежно від природи електроліту, швидкість анодного розчинення алюмінію суттєво зменшується. Крім того, спостерігається сповільнення і катодних процесів. Встановлено, що катодні і анодні процеси не супроводжуються електрохімічними перетвореннями метану. Ефективність впливу адсорбції метану сильно збільшується при попередній активації поверхні алюмінію завдяки катодній поляризації, особливо в нейтральних розчинах. Адсорбція метану пояснюється наявністю активної поверхні алюмінію та утворенням кластерів метану в порах гідратованої оксидної плівки.

Здатність метану гальмувати катодний і анодний процес на алюмінії в різних середовищах може знайти застосування у анодуванні, захисті металу від корозії, селективному анодному травленні алюмінію з метою отримання високорозвиненої поверхні або для відновлення контурів деформованих ділянок металу.

Література

1. Белецкий В. М. Алюминиевые сплавы : справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов ; под общей ред. И. Н. Фридляндера. – К. : Коминтех, 2005. – 365 с.

2. Аверьянов В. В. Справочник по анодированию / В. В. Аверьянов. – М. : Химия, 1986. – 234 с.

3. Байрачный Б. И. Электрохимия вентильных металлов / Б. И. Байрачный, Ф. К. Андрющенко. – Харьков : Высшая школа, 1985. – 144 с.

4. Стремецький О. І. Вплив газового середовища на процес анодного травлення алюмінію / О. І. Стремецький, Ю. Ф. Фатєєв // Вісник Львівського університету. – 2002. – Вип. 42, Ч. 1. – С. 234–237.

5. Самарцев В. М. Анионная активация алюминия при анодном растворении в галидсодержащих средах / В. М. Самарцев, И. Д. Зарцын, А. П. Караваева, И. К. Маршаков // Защита металлов. – 1992. – Т. 28, № 5. – С. 760–767.

6. Петин А. Ю. Совместная адсорбция метана и неполярных углеводородов мезопористым силикагелем в присутствии воды / А. Ю. Петин, В. М. Гунько, Я. Скубишевска-Зиемба, Р. Лебода, В. В. Туров // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 138–147.

References

1. Beleckij V. M. Alyuminievye splavy : spravochnik / V. M. Beleckij, G. A. Krivov ; pod obshej red. I. N. Fridlyandera. – K. : Kominteh, 2005. – 365 s.

2. Averyanov V. V. Spravochnik po anodirovaniyu / V. V. Averyanov. – M. : Himiya, 1986. – 234 s.

3. Bajrachnyj B. I. Elektrohimiya ventilnyh metallov / B. I. Bajrachnyj, F. K. Andryushenko. – Harkov : Vysshaya shkola, 1985. – 144 s.

4. Stremetskyi O. I. Vplyv hazovoho seredovyshcha na protses anodnoho travlennia aliuminiiu / O. I. Stremetskyi, Yu. F. Fatieiev // Visnyk Lvivskoho universytetu. Ser. khim. – 2002. – Vyp. 42, Ch. 1. – S. 234–237.

5. Samarcev V. M. Anionnaya aktivaciya alyuminiya pri anodnom rastvorenii v galidsoderzhashih sredah / V. M. Samarcev, I. D. Zarcyn, A. P. Karavaeva, I. K. Marshakov // Zashita metallov. – 1992. – T. 28, № 5. – S. 760–767.

6. Petin A. Yu. Sovmestnaya adsorbciya metana i nepolyarnyh uglevodorodov mezoporistym silikagelem v prisutstvii vody / A. Yu. Petin, V. M. Gunko, Ya. Skubishevska-Ziemba, R. Leboda, V. V. Turov // Khimiia, fizyka ta tekhnolohiia poverkhni. – 2010. – T. 1, № 2. – S. 138–147.

Рецензія/Peer review : 20.10.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-233-236
УДК 624.012

О.О. ЯРЕМЕНКО
Одеська державна академія будівництва і архітектури
Н.О. ЯРЕМЕНКО, І.М. МИРОНЕНКО
Одеський національний морський університет

ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ КЕСОННІ ПЕРЕКРИТТЯ

Плоскі залізобетонні перекриття є найбільш поширеними елементами будівель та споруд. Вони часто використовуються в будівництві. В роботі виконано розрахунок збірно-монолітного кесонного перекриття торгового залу з квадратними кесонами. Балки перекриття збірні переднапружені. Характеристики досліджуваної моделі надані в статті. Розрахунок зроблений за допомогою комп'ютерної програми, яка чисельно реалізує завдання розрахунку залізобетонних ростверків на основі просторової розрахункової схеми з урахуванням фізичної нелінійності. Під час розрахунку програмний комплекс враховує повзучість бетону в умові спирання кесона по контуру, попереднє напруження арматури балок одного з напрямків. Наведено результатів комп'ютерних досліджень моделі. Розглянуто експериментальні дані. Встановлено, що розрахункові дані відповідають експериментальним.

Ключові слова: кесон, попереднє напруження, арматура, прогин перекриття, рівномірне навантаження, тріщини.

O.O. YAREMENKO
Odessa State Academy of Construction and Architecture
N.O. YAREMENKO, I.N. MIRONENKO
Odessa National Maritime University

PRELIMINARY STRESSED REINFORCED CONCRETE CAISSON SLABS

Cross beam systems are widely used in construction. They are used in bridge construction, industrial, civil and hydraulic engineering. Flat reinforced concrete floors are the most common elements of various buildings and structures. The use of engineering software systems that take into account new methods and algorithms for calculating the stress-strain state and the bearing capacity of reinforced concrete beams and transverse systems is an actual area of work. In the work, the calculation of the precast-monolithic caisson floor of the trading floor with square caissons is performed. Prefabricated floor beams. Characteristics of the studied model are given in the article. The calculation was performed using a computer program that numerically implements the tasks of calculating reinforced concrete grillages based on a spatial calculation scheme taking into account physical nonlinearity. In the calculation, the software package takes into account the creep of concrete, the condition of supporting the caisson along the contour, the prestressing of the reinforcement of the beams of one of the directions. The rigidity of the floor beams in areas with cracks is determined according to building codes. The stiffness of the beams in areas without cracks is determined by a formula that takes into account the long-term creep of concrete. The results of computer studies of the caisson floor model are presented. Experimental data are considered. As a result of the calculation, it was found that the calculated deflections correspond to the experimental data. The effectiveness of the constructive solution of the horizontal and monochromatic caissons with the short front spacing ribs, which is free and tightened and three.

Keywords: caisson, prestressing, reinforcement, floor deflection, uniform load, cracks.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Системи перехресних балок поширені в будівництві, а саме промисловому, цивільному, гідротехнічному і в мостобудуванні.

Плоскі залізобетонні перекриття – найбільш поширені елементи будівель і споруд. Всі плоскі перекриття можна поділити на два основних типи: балкові і безбалкові. Балкові перекриття включають балки, які йдуть в одному або двох напрямках. На них спираються плити. У безбалкових перекриттях балки відсутні. Плити таких перекриттів спираються на колони. Колони часто мають у своїй верхній частині розширення – капітелі. Залежно від способу зведення перекриття бувають збірними, монолітними і збірно-монолітними. Застосовують, в основному, збірні і збірно-монолітні перекриття.

У зв'язку зі зростанням вимог до архітектури цивільних будівель, підвищенням якості забудови міст, удосконалюються архітектурно-планувальні рішення. Переходять від традиційних схем будівель і споруд прямокутної форми, в яких перекриття працюють за найпростішою схемою балок і плит, до більш складних плоских і просторових систем. З цієї точки зору для цивільних і промислових будівель при великих прольотах і навантаженнях представляє інтерес застосування перехресних систем і конструкцій у вигляді кесонних перекриттів зі звичайного і попередньо напруженого залізобетону, та удосконалення їх розрахунку за допомогою програмних комплексів.

Аналіз публікацій

Теорія розрахунку перехресних балок в пружній стадії почала активно розвиватися з початку двадцятого століття. Пов'язано це з необхідністю розрахунку мостів, перекриттів різних споруд. Першим цю теорію виклав відомий вчений – академік І. Г. Бубнов [1]. Ним була запропонована система звичайних диференціальних рівнянь вигину ортогональних перехресних балок і дана методика її розв’язку. Якщо перекриття містить n перехресних зв'язків, І. Г. Бубнов зводить проблему до вирішення системи n диференціальних рівнянь. В ході її вирішення він розділяє систему на незалежні рівняння за допомогою введення в якості невідомих функцій, що представляють собою лінійні комбінації функцій прогинів перехресних зв'язків. За знайденими прогинами знаходять згинальні моменти і перерізуючи сили. При

виведенні системи диференціальних рівнянь вважалося, що все розподілене по площі перекриття зовнішнє навантаження сприймається балками головного напрямку, а балки іншого напрямку завантажені тільки реакціями взаємодії з балками головного напрямку. Теорія знайшла своє продовження в роботах П. Ф. Папковіча [2, 3]. Він запропонував більш простий метод рішення системи диференціальних рівнянь, так званий метод «головних вигинів». Широкі можливості для дослідження роботи систем перехресних балок надає використання сучасних інженерних програм. Але під час розрахунку кесонних перекриттів виникає необхідність верифікації отриманих результатів, оскільки матеріал цих конструкцій – залізобетон – володіє певною специфікою.

Виділення невирішених частин загальної проблеми

Застосування інженерних програмних комплексів, які враховують нові методи і алгоритми для проведення розрахунків напружено-деформованого стану та несучої здатності залізобетонних балок і систем перехресних балок є актуальним напрямком роботи. Програмні комплекси, які реалізують розрахункові задачі, повинні повністю відображати просторовий характер роботи залізобетонних конструкцій, пошкодження елементів конструкцій, а також враховувати нелінійний характер деформування матеріалів. Для реалізації такого алгоритму, авторами розроблена комп'ютерна програма RUSZT-KRSSON [4], написана на Delphi. Дана програма ураховує повзучість бетону, попереднє напруження арматур балок одного з напрямків і умов спирання по контуру кесона. Також зроблений розрахунок даної моделі за допомогою комп'ютерної програми ANSIS.

Цілі

Розвиток комп'ютерних методів розрахунку і аналізу напружено-деформованого стану систем перехресних залізобетонних балок при короткочасному і тривалому дії рівномірного навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розроблені і впроваджені в практику будівництва системи перехресних балок у вигляді збірно-монолітних кесонних перекриттів (СМКП) з тонкостінних коробчастих елементів, між ребрами яких встановлюється звичайна або попередньо напружена арматура [5, 6].

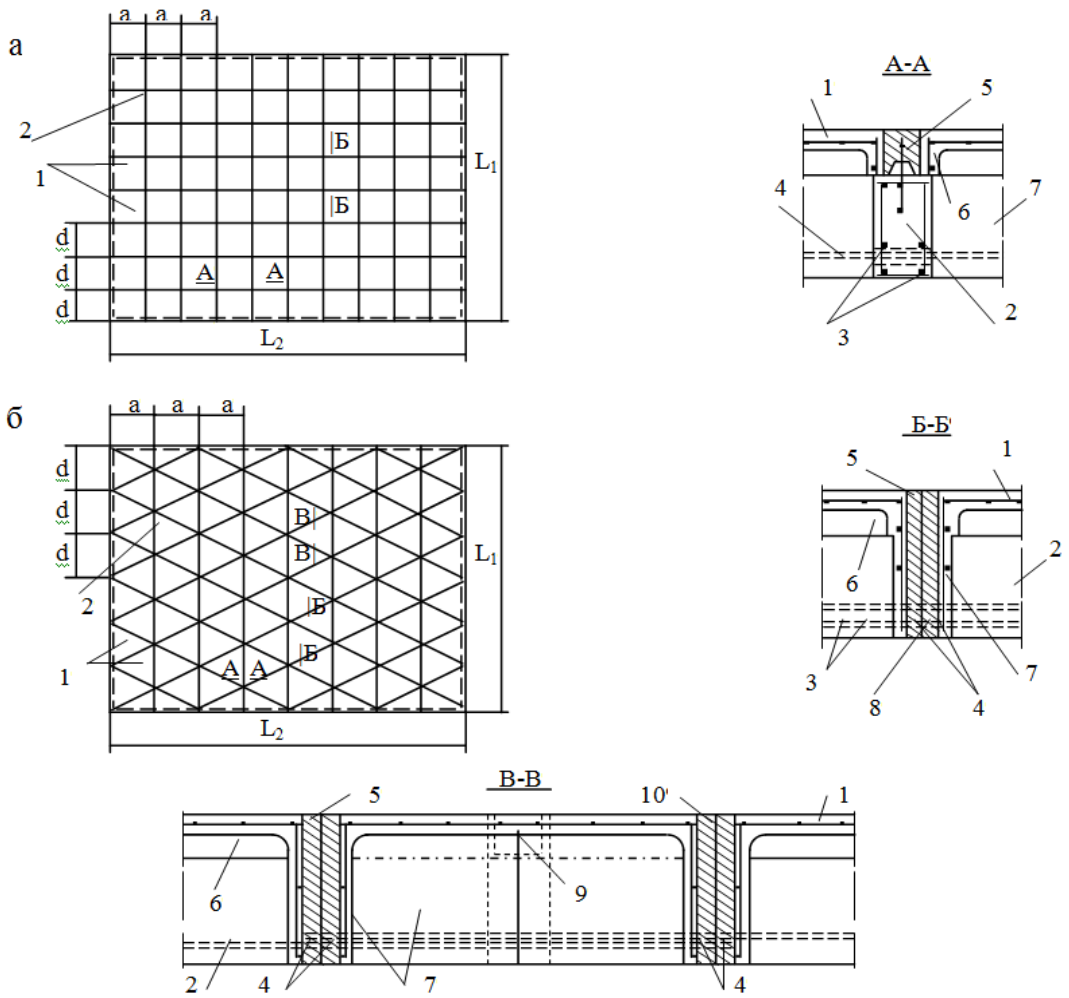


Рис. 1. Конструктивні схеми попередньо напружених збірно-монолітних кесонних перекриттів:
а – з прямокутними кесонами; б – з трикутними кесонами; 1 – ребристі прямокутні або трикутні плити; 2 – збірні переднапружені балки; 3 – напружена арматура балок; 4 – робоча арматура монолітних балок; 5 – бетон замонолічування балок і плит; 6 – низькі ребра плит; 7 – високі ребра плит; 8 – отвори для пропуску арматури монолітних балок; 9 – кутові консолі трикутних плит; 10 – каркаси арматури монолітних балок

Ці конструкції призначені для багатоповерхових будівель з прольотами більше 9–12 м. Їх роблять з двох видів збірних залізобетонних елементів (рис. 1): попередньо напружених балок прямокутного перерізу і ребристих плит квадратної або трикутної форми з розмірами сторін 1,5; 2,0 і 3,0 м. Плити по контуру мають низькі ребра для установки на збірні балки і високі ребра, що проходять вниз між збірними балками для утворення бічної опалубки монолітних балок інших напрямків. Після монтажу, додаткового армування і замонолічування збірних елементів утворюються перехресні системи з балками в двох або трьох напрямках. У таких системах збірні попередньо напружені балки, встановлені в одному, більш короткому напрямку, замонолічують зверху бетоном з низькими ребрами плит, а монолітні балки інших напрямків (між високими ребрами плит) замонолічують бетоном на всю висоту. Робоча арматура монолітних балок у вигляді окремих стрижнів або пучків пропускається між високими ребрами плит через отвори, передбачені в збірних балках. Монолітні балки додатково армуються каркасами, стики яких виконуються внахлест над збірними балками в вузлах. Опалубка для замонолічування перекриттів встановлюється у вигляді інвентарних щитів тільки по нижній межі монолітних балок і в швах з підвіскою її до збірних балок.

В ході розрахунку розглянута конструкція – система перехресних балок таврового перетину, що чинять опір вигину [7]. Крутний момент у таких системах на порядок менше, ніж згинальний [4]. Опір системи крутінню не враховується. Згідно з будівельними нормами визначена жорсткість балок на ділянках з тріщинами. На ділянках без тріщин жорсткість визначається за формулою, що враховує тривалу повзучість бетону:

$$B^* = E_b \cdot \nu(t) \cdot I_{red}, \nu(t) = \frac{k}{1 + k\varphi}, \tag{1}$$

де I_{red}– момент інерції приведеного перерізу, E_b – модуль пружності бетону, k = 0,85 коефіцієнт, який враховує вплив не пружних деформацій бетону при короткочасній дії навантаження, φ – характеристика повзучості бетону [8].

Розрахунок згинальних попередньо напружених елементів при утворенні нормальних тріщин:

$$M_r \le M_{crc}, \tag{2}$$

де M_r – момент зовнішніх сил, розташованих по одну сторону від розглянутого перерізу щодо осі, паралельної нульовій лінії, і яка проходить через ядрову точку, найбільш віддалену від розтягнутої зони. Для елементів, до тріщиностійкості яких пред'являються вимоги першої категорії, площа перерізу напруженої арматури у всіх випадках визначається з умови забезпечення їх тріщиностійкості. Дане правило в більшості випадків відноситься також до елементів, для тріщиностійкості яких слід дотримуватися вимог другої категорії.

Можна записати, що опір нормального перетину утворення тріщин [8]

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} + P(e_{0p} + r), \tag{3}$$

де

$$W_{pl} = \gamma W_{red}. \tag{4}$$

Це момент опору приведеного перерізу елемента по розтягнутій від зовнішнього навантаження зоні з урахуванням не пружних деформацій розтягнутого бетону в припущенні відсутності поздовжньої сили N і зусилля попереднього обтиску P; γ – коефіцієнт, що враховує вплив пластичних деформацій бетону розтягнутої зони; e_{0p} – відстань від нейтральної осі перетину до зусилля P. Вплив пластичних деформацій бетону стиснутої зони враховується шляхом зменшення ядерної відстані $\boldsymbol{r}$.

Результати розрахунку з використанням програмного комплексу RUSZT-KESSON та ANSYS дослідної конструкції СМКП з квадратними кесонами 2×2 м перекриття торгового залу розмірами 12×18 м у Львові. Перекриття по контуру спирається на несучі стіни. Балки прольотом l = 12 м – збірні переднапружені прямокутного перерізу 300×300 мм. Бетон класу В25. Арматура 2d28 мм зі сталі класу А – III в. Величина попереднього напруження σ_0=350 МПа. Арматура монолітних балок великого прольоту L = 18 м – 2d25 мм зі сталі класу А-IIIв. Бетон замонолічування класу В20. Повна висота перерізу кесона – 500 мм. Товщина плити кесона – 40 мм.

Натурні випробування конструкції перекриття проводилися рівномірним навантаженням в три етапи до рівня р = 3,5 кН/м^2. Витрата бетону на 1 м^2 перекриття – 0,15 м^3. Максимальний прогин перекриття при повному навантаженні склав 29 мм, тобто 1/415 прольоту l [5]. Тріщини в ребрах великого ненапруженого прольоту не виявлені. В середньому ребрі менш напруженого прольоту були виявлені волосяні тріщини з розвитком на висоту до рівня робочої арматури.

Розрахункові дані прогинів і згинальних моментів перехресної системи при короткочасному (характеристика повзучості бетону φ = 0) і тривалому (φ = 1,4) навантаженні рівномірно-розподіленим навантаженням наведені в таблиці 1.

Під час утворення тріщин згинальні моменти становлять 186 кНм в напрямку меншого прольоту; 23,4 кНм – в напрямку більшого прольоту. За даними розрахунку тріщини в перекритті не виникали. Прогини розрахункові та експериментальні якісно співпадають. При тривалій дії навантаження прогини збільшуються приблизно в два рази. Перерозподіл зусиль при повзучості практично не спостерігається.

Таблиця 1

Розрахункові дані прогинів і згинальних моментів перехресної системи

Величина	RUSZT-KESSON		ANSYS	
Повзучість бетону	$\varphi = 0$	$\varphi = 1{,}4$	$\varphi = 0$	$\varphi = 1{,}4$
Прогини, мм	19,5	42	20	40
Згинальні моменти, кНм	136	142	130	143

Висновки. В результаті розрахунків з використанням програмних комплексів RUSZT-KESSON та ANSYS та у порівнянні з експериментальними даними підтверджена ефективність конструктивного рішення збірно-монолітних кесонних перекриттів з попередньо-напруженими ребрами короткого прольоту, що володіють підвищеною жорсткістю і тріщиностійкістю.

Література

1. Бубнов И.Г. Строительная механика корабля / Бубнов И.Г. – Петербург, 1914. – 141 с.
2. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля / Папкович П.Ф. – М. – Л. : Морской транспорт, 1949. – 557 с.
3. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля / Папкович П.Ф. – Л. : Судпромгиз, 1962. – 573 с.
4. Яременко Н.А. О расчете балочных ростверков методом перемещений / Н.А. Яременко // Вестник ОНМУ. – Одесса, 2005. – Вып. 5 – С. 173–188.
5. Гнидец Б.Г. Предварительно напряженные сборно-монолитные кессонные перекрытия / Б.Г. Гнидец, П.П. Завадяк, П.П. Рутковский и др. // Передовой производственный опыт. – 1989. – Вып. 1. – С. 12–43.
6. Гнідець Б.Г. Збірно-монолітні статично невизначені залізобетонні конструкції з напруженими стиками і регулюванням зусиль / Б.Г. Гнідець // Вісник Львівського ДАУ. – Львів, 2000. – № 1. – С. 5–43.
7. Кваша В.Г. Расчет однопролетных и неразрезных строений железобетонных автодорожных мостов / В.Г. Кваша, А.Ф. Яременко, О.В. Філін // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ, 2004. – Вип. 69 – С. 81–87.
8. Кудзис А.П. Железобетонные и каменные конструкции. Ч. I. Материалы, конструирование, теория и расчет / Кудзис А.П. – М. : Высшая школа, 1988. – 287 с.

References

1. Bubnov I.G. Structural mechanics of the ship. Petersburg, 1914. 141 p.
2. Papkovich P.F. Structural mechanics of the ship. M. L.: Morskoi transport, 1949. 557 p.
3. Papkovich P.F. Proceedings on the structural mechanics of the ship. L.: Sudpromgiz, 1962. 573 p.
4. Yaremenko N.A. On the calculation of beam grillages by the displacement method. Vestnik ONMU. Odessa, 2005. Issue. 5, p. 173–188.
5. Gnidets B.G., Zavadyak P.P., Rutkovsky P.P. et al. Pre-stressed precast-monolithic caisson floors. Advanced manufacturing experience. Sat 1989. Issue 1. p. 12–43.
6. Gnidets B.G. Zbirno-monolitni statically undetermined concreted constructions with loaded sticks and regulating. Vistnik of the Lviv DAU. Lviv, 2000. No. 1. p. 5–43.
7. Kvasha V.G., Yaremenko A.F., Filin O.V. Calculation of single-span and continuous structures of reinforced concrete road bridges. Automobile roads and roads. Kyiv, 2004. Vip. 69, p. 81–87.
8. Kudzis A.P. Reinforced concrete and stone structures. Part I. Materials, design, theory and calculation. M.: Vishaya shkola, 1988. 287 p.

Рецензія/Peer review : 01.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020

DOI 10.31891/2307-5732-2019-279-6-237-239
УДК 004.4

С.С. ПЕТРОВСЬКИЙ, Т.К. СКРИПНИК, О.Ю. ІВАНОВ
Хмельницький національний університет

ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ЖУРНАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАУКОВИХ ВИДАНЬ З ДОСЛІДЖЕНЬ ОСВІТНЬОГО НАПРЯМКУ

У статті розглядаються особливості існуючих електронних інформаційних журнальних систем, їх можливості, вимоги до розробки та тестування електронних журнальних систем.

Ключові слова: *інформаційні системи, бази даних, інформаційне суспільство, електронні журнальні системи.*

T.K. SKRYPNYK, S.S. PETROVSKY, O.Y. IVANOV
Khmelnytskyi National University

REVIEW OF INFORMATION ELECTRONIC JOURNAL SYSTEMS FOR SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON EDUCATIONAL RESEARCH

The article deals with the features of existing electronic information journal systems, their capabilities, requirements for the development and testing of electronic journal systems. The need to transition to an information society is closely related to the changing nature of the impact of scientific and technological progress on people's lives. At the same time, the lifestyle of the majority of the population, the socio-psychological model of behaviour of people and society as a whole is radically changing. One of the most important indicators of lifestyle change is the development and use of new information and communication technologies in all spheres of social life and activity, the level of production and consumption of information products and services by society. Therefore, it is obvious that the attitude to information and the expansion of opportunities for obtaining and applying information to strengthen human potential and its development in many directions. All of the above determines the emergence and necessity of solving a socially important task-the creation of a socio-psychological model of behaviour of a member of the information society, the identification of "points" and methods of influence that ensure normal adaptation and comfortable existence of a person in the information society. Formulation of the objectives of the article (problem statement). The purpose of this article is a comparative analysis of capabilities and services software development for data models, rules of their processing and interface electronic journal systems and their capabilities. Presentation of the main material. We will analyse the opportunities and services provided by the existing electronic journal systems. The analysis of scientific sources indicates the absence of an agreed position on the established name of technologies to support the editorial and publishing process of electronic scientific journals. Generalizing the existing interpretations, we give definitions.

Key words*: information systems, databases, information society, electronic journal systems.*

Сьогодні усвідомлені головні передумови і реальні шляхи формування і розвитку інформаційного суспільства в Україні. Цей процес має глобальний характер і відповідно неминуче входження нашої країни в інформаційну спільноту. Україна повинна ввійти в сім'ю технологічно та економічно розвинутих країн на правах повноцінного учасника світового цивілізаційного розвитку зі збереженням політичної незалежності, національної самобутності і культурних традицій, із розвинутим громадянським суспільством і правовою державою.

Постановка проблеми. Необхідність переходу до інформаційного суспільства тісно пов'язана зі зміною характеру впливу науково-технічного прогресу на життя людей. При цьому кардинально змінюється спосіб життя більшої частини населення, соціально-психологічна модель поведінки людей і суспільства в цілому. Одним із найважливіших показників зміни способу життя є розвиток та використання нових інформаційно-комунікаційних технологій у всіх сферах соціального життя і діяльності, рівень виробництва і споживання суспільством інформаційних продуктів і послуг. Тому очевидним є відношення до інформації і розширення можливостей отримання і застосування інформації для посилення людського потенціалу і його розвитку у багатьох напрямках. Все вище перераховане визначає виникнення і необхідність розв'язання суспільно значущої задачі – створення соціально-психологічної моделі поведінки члена інформаційного суспільства, виявлення «точок» і методів впливів, які забезпечують нормальну адаптацію і комфортне існування людини в умовах інформаційного суспільства.

В Україні за останні десять років сформувалися фактори соціально-економічного, науково-технічного і культурного розвитку, які слід розглядати як передумови переходу до інформаційного суспільства. Разом з тим процес впровадження новітніх інформаційних технологій у різноманітних сферах діяльності в Україні є досить консервативним. Цей процес без використання інформаційних технологій характеризується високими витратами часу, що, в свою чергу, призводить до збільшення часу робіт та їх собівартості. Цю проблему можна розв'язати за рахунок впровадження інформаційних технологій у процес впровадження електронних відкритих журнальних систем для наукових видань з освітніх досліджень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є проведення порівняльного аналізу можливостей та послуг програмних продуктів для розробки моделі даних, правил їх опрацювання та інтерфейсу користувача електронних журнальних систем та їх можливостей.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз можливостей та послуг, які надають існуючі електронні журнальні системи. Аналіз наукових джерел свідчить про відсутність узгодженої позиції щодо усталеної назви технологій для підтримки редакційно-видавничого процесу електронних наукових журналів. Узагальнюючи існуючі трактування, можемо дати наступне означення [2–4]. Електронна журнальна система (ЕЖС) – це програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати управління та поточне

обслуговування редакційно-видавничим процесом наукових журналів та збірників статей [1]. Зразки електронних журнальних систем, що мають найбільший рейтинг використання у науковому середовищі:

GAPworks, розроблена German Academic Publishers (GAP) Project. Останнє оновлення проекту було здійснено в червні 2006 р., однак не містило супровідної документації та інструкцій щодо інсталяції [6].

Topaz – створена на замовлення та для підтримки публічної наукової бібліотеки Public Library of Science (PLoS) [7].

DiVA (Digitala Vetenskapliga Arkivet), створена у 2000 р. Центром електронного видавництва Упсальського університету (Швеція) з метою підтримки он-лайн сховища локальних наукових матеріалів, у першу чергу, електронних дисертацій [8].

Open Journal Systems (OJS) – створена ініціативною групою Public Knowledge Project (PKP) Університету Британської Колумбії спільно з Університетом Саймона Фрайзера (2002 р.) [9].

Використання цієї системи має переваги: спрощене налаштування, більш потужні функціональні можливості та скорочення витрат на публікацію наукового продукту [5]. З іншого боку, для функціонування всіх зазначених електронних журнальних систем необхідною умовою є наявність бази даних, розташованої на веб-сервері, з постійним безперебійним доступом до мережі Інтернет, що вимагає від наукової установи придбання або оренди веб-сервера й замовлення послуг компетентного системного адміністратора.

Проведемо огляд однієї з цих систем, а саме Open Journal Systems.

Open Journal Systems (OJS) – програмна платформа для підтримки видавництва й управління електронними науковими журналами розроблена в межах проекту Public Knowledge Project з метою надання відкритого доступу до результатів наукових досліджень та їх поширення в мережі Інтернет (рис. 1).

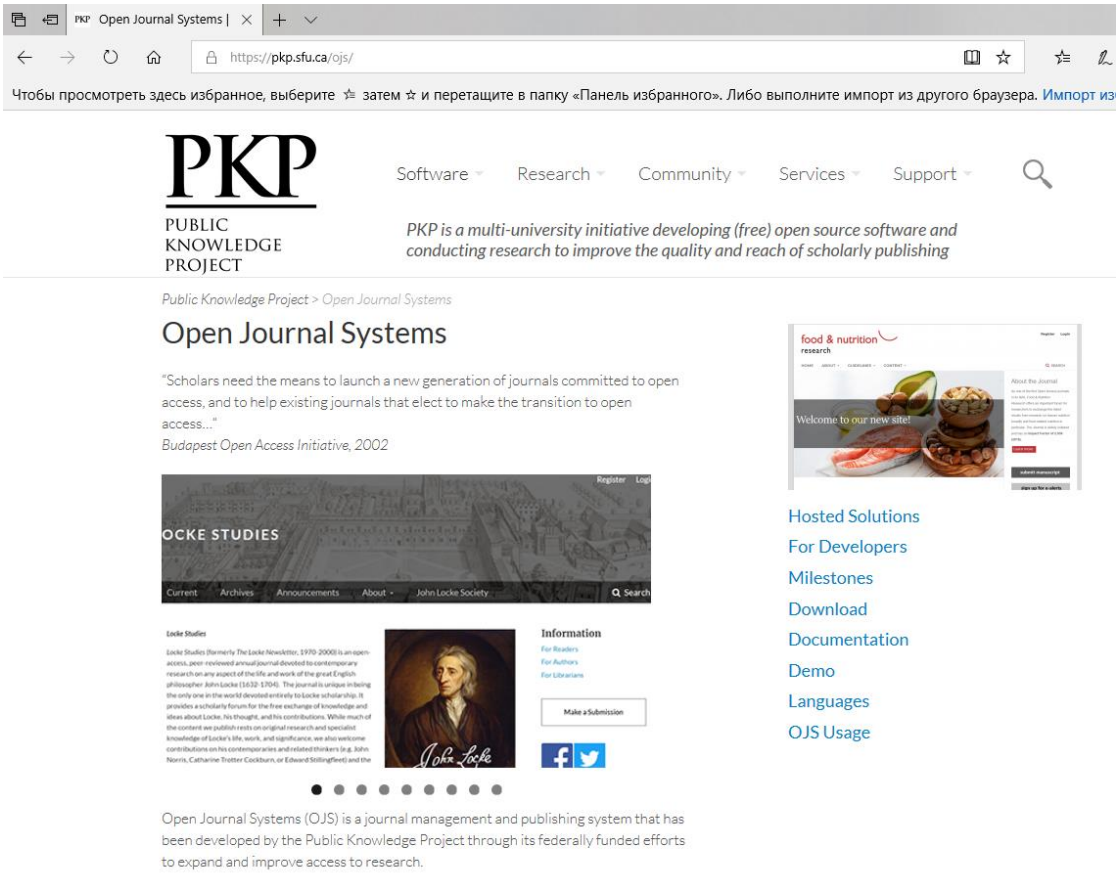


Рис. 1. Open Journal Systems

В Open Journal Systems представлено комплекс функціональних можливостей і потужний інструментарій управління редакційно-видавничим процесом на всіх його етапах – від завантаження рукопису на сайт до публікації готових випусків журналу он-лайн.

Проведений аналіз дає змогу визначити такі можливості ЕЖС: оперативність процесу підготовки і рецензування статей; публікація статей і випусків, необмежених за розміром (в сторінках або в Мб); якісний багаторівневий пошук необхідних матеріалів за допомогою низки пошукових інструментів; необмежений безперебійний доступ до контенту для мільйонів користувачів в будь-який час, з будь-якого робочого місця; налагодження безпосереднього контакту користувачів з автором статті через електронну пошту; отримання необхідного матеріалу в електронному вигляді, зручному для подальшої обробки, копіювання та ін.

Спираючись на вище викладене, можна визначити набір основних критеріїв та показників якості електронних журнальних систем з розподілом на чотири групи: 1) управління контентом, 2) сервіси адміністрування, 3) користувацький інтерфейс, 4) підтримка та супровід (рис. 2).

Рис. 2. Напрямки оцінювання якості ЕЖС

Критерії можуть бути застосовані як керівництво для розробників у проектуванні/тестуванні нових ЕЖС.

Висновки. Спираючись на результати дослідження інформаційних систем для підтримки електронних наукових журналів, вдалося встановити, що переведення редакційно-видавничого процесу в он-лайн формат за допомогою електронних журнальних систем є важливим кроком у напрямку впровадження інформаційного суспільства в Україні та надає наступні переваги:

– скорочення часу на розгляд рукописів і їх пересилання між авторами, рецензентами і редакторами;

– підвищення продуктивності роботи завдяки централізованому архівуванню історії редакційних дій, рецензій експертів, контактних даних та всіх версій документів;

– економія фінансового забезпечення на утримання штату, друк та розсилку опублікованих випусків;

– необмежений постійний відкритий доступ до результатів наукових досліджень одночасно великої кількості користувачів;

– інформаційно-аналітична підтримка педагогічних досліджень шляхом індексування опублікованих статей в наукометричних базах даних.

Література

1. Спірін О.М., Яцишин А.В., Іванова С.М., Кільченко А.В., Лупаренко Л.А. Використання електронних систем відкритого доступу для інформаційно-аналітичної підтримки педагогічних досліджень [Електронний ресурс] // Інформаційні технології і засоби навчання. 2016. № 5. С. 136–174. Режим доступу : http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1501.

2. Лупаренко Л.А. Використання електронних журнальних систем відкритого доступу для випуску науково-освітніх видань: порівняльний аналіз програмного забезпечення [Електронний ресурс] // Інформаційні технології і засоби навчання. 2011. Т. 25. № 5. Режим доступу : http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/573.

3. Тарасов А.О., Коновалов С.В. Перспективы Open Journal Systems – on-line системы для управления и публикации журналов. Материалы Всероссийской научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Новокузнецк. 2014. С. 237–238.

4. Елизаров А.М., Зуев Д.С., Липачёв Е.К. Информационные системы управления электронными научными журналами // Научно-техническая информация. Серия 1: организация и методика информационной работы. 2014. № 3. С. 31–38.

5. Ахметов Д.Ю., Елизаров А.М., Липачёв Е.К. Система автоматизации редакционных процессов на платформе электронных научных журналов // Ученые записки ИСГЗ. 2014. № 1. С. 228–233.

6. Електронна журнальна система GAPworks [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://gapworks.berlios.de.

7. Електронна журнальна система Topaz [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://www.topazproject.org/trac.

8. Електронна журнальна система DiVA (Digitala Vetenskapliga Arkivet) [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://www.diva- portal.org/smash/aboutdiva.jsf.

9. Електронна журнальна система Open Journal Systems (OJS) [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://pkp.sfu.ca/ojs.

References

1. Spirin O.M., Yatsyshyn A.V., Ivanova S.M., Kilchenko A.V., Luparenko L.A. Vykorystannia elektronnykh system vidkrytoho dostupu dlia informatsiino-analitychnoi pidtrymky pedahohichnykh doslidzhen [Elektronnyi resurs] // Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia. 2016. № 5. S. 136–174. Rezhym dostupu : http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1501.

2. Luparenko L.A. Vykorystannia elektronnykh zhurnalnykh system vidkrytoho dostupu dlia vypusku naukovo-osvitnikh vydan: porivnialnyi analiz prohramnoho zabezpechennia [Elektronnyi resurs] // Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia. 2011. T. 25. № 5. Rezhym dostupu : http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/573.

3. Tarasov A.O., Konovalov S.V. Perspektivy Open Journal Systems – on-line sistemy dlya upravleniya i publikacii zhurnalov. Materialy Vserossijskoj nauchn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Novokuzneck. 2014. S. 237–238.

4. Elizarov A.M., Zuev D.S., Lipachyov E.K. Informacionnye sistemy upravleniya elektronnymi nauchnymi zhurnalami // Nauchno-tehnicheskaya informaciya. Seriya 1: organizaciya i metodika informacionnoj raboty. 2014. № 3. S. 31–38.

5. Ahmetov D.Yu., Elizarov A.M., Lipachyov E.K. Sistema avtomatizacii redakcionnyh processov na platforme elektronnyh nauchnyh zhurnalov // Uchenye zapiski ISGZ. 2014. № 1. S. 228–233.

6. Elektronna zhurnalna systema GAPworks [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : http://gapworks.berlios.de.

7. Elektronna zhurnalna systema Topaz [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : http://www.topazproject.org/trac.

8. Elektronna zhurnalna systema DiVA (Digitala Vetenskapliga Arkivet) [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : http://www.diva-portal.org/smash/aboutdiva.jsf.

9. Elektronna zhurnalna systema Open Journal Systems (OJS) [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : https://pkp.sfu.ca/ojs.

Рецензія/Peer review : 10.11.2019 р. Надрукована/Printed : 02.01.2020

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Підп. до друку 30.12.2019. Ум. друк. арк. 28,00. Обл.-вид. арк. 27,86.
Формат 30×42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № 8/20

Тиражування здійснено з оригінал-макета,
виготовленого редакцією журналу «Вісник Хмельницького національного університету»
редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету.
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1, тел. (0382) 67-51-08; 77-33-63.
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.